УДК 551.553.8:[551.511.2+551.511.3]

doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-20-41

Разделение конвективных штормов. Часть II. Организация мезомасштабной структуры грозоградового процесса

Е.М. Лившиц¹, В.И. Петров²

- ¹ Франкфурт на Майне, Германия, evmaleposoru@googlemail.com
- ² Специальная служба активных воздействий на гидрометеорологические процессы Республики Молдова, Кишинев

Исследование феномена разделения мощных конвективных штормов привело к выводу об управлении этим процессом со стороны мезо-β-масштабных конвективных структур, а влияние сдвига ветра с высотой сводится лишь к предпочтительной реализации одного из вариантов этих структур. На примере внутримассового процесса в Молдове рассматривается динамика формирования мезо-β-масштабных конвективных ячеек, внешне похожих на открытые ячейки Рэлея—Бенара, и мезомасштабных конвективных линий, похожих на «облачные улицы». Впервые наиболее полно описаны общие свойства этих мезомасштабных структур, которые применяются в сверхкраткосрочном прогнозе динамики конвективных штормов при проведении противоградовых работ, в активных воздействиях по изменению режима осадков из конвективной облачности, штормоповещении, и могут быть полезны для различных отраслей народного хозяйства.

Ключевые слова: мезомасштабные конвективные ячейки (ММКЯ), мезомасштабные конвективные линии (ММКЛ), узел, грань, конвективный шторм, вектор эволюции, сверхкраткосрочный прогноз.

The splitting of convective storms. Part II. Organizations of the mesoscale structure of the Thunderstorm process

E.M. Livshits¹, V.I. Petrov²

- ¹ Frankfurt am Main, Germany, evmaleposoru@googlemail.com
- ² Special Service of Active Influences on Hydrometeorological Processes of the Republic of Moldova, Kishinev

Based on the analysis of the phenomenon of splitting of powerful convective storms with more sound factual information thanks to technical and methodological progress, the paper reconsiders the hypothesis published by the authors in 1983 on the control of powerful convection by meso-β-scale processes. At weak winds and weak wind shear with height, they are expressed as polygonal structures similar to open Rayleigh—Benard cells, with a modal size of 30—40 km. At medium and large shear, they are expressed as linear structures resembling "cloud streets". These structures form on the surface boundary layer and trigger strong penetrating convection. The example of a powerful intra-mass thunderstorm process is analyzed, in which the previously unreported phenomenon of multicell hail storm splitting is found with one of the storms remaining in place after splitting and continuing to produce strong hail with damage. The dynamics of mesoscale convection cell (MSCC) and mesoscale convection line (MSCL) formation were considered for the first time. Based on this view of convection organization, the phenomenon of storm splitting as well as other convective phenomena are first described and explained without involving the parameter of wind shear with altitude. The application of the Lagrangian coordinate system (LSC), which excludes the masking effect of mean tropospheric displacement, allows such structures to be constructed. This method reduces the number of options by an order of magnitude for displaying phenomena marked by a stationary observer and significantly reduces the time for making operational decisions. The proposed method can be useful in active influencing on convective processes, storm warning and in many branches of national economy.

Keywords: Mesoscale convective cells (MSCC), Mesoscale convective lines (MSCL), knot, edge, convective storm, evolution vector, ultra-short-range forecast.

For citation: *E.M. Livshits, V.I. Petrov.* 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. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-20-41

Введение

Феномен разделения мощных конвективных штормов, о котором шла речь в [1], взят нами в качестве одного из многих, связанных с их динамикой и кинематикой.

Вначале рассмотрим основные классификации типов штормов. При этом ограничимся масштабом конвективного шторма и тех объектов мезо- β -масштаба, которые мы определяем как ММКЯ (мезомасштабные конвективные ячейки) и ММКЛ (мезомасштабные конвективные линии). Мы не касаемся классификаций, включающих в себя шквальные линии, кластеры различных типов, боу-эхо, деречо, которые предполагают отнесение их как к мезо- β -, так и к мезо- α -масштабам [2].

Первую наиболее полную морфологическую классификацию штормов дали Чисхолм и Реник [3], выделившие 3 типа штормов: одноячейковые, многоячейковые (мультиячейковые) и суперячейковые.

Василофф и др. [4], наблюдая процессы перехода мультиячейковых штормов в суперячейки и обратно, считали, что структура конвективного шторма могла бы быть классифицирована скорее в виде континуума, чем как отдельные сущности типа мультиячейкового или суперячейкового штормов. Фут и Фрэнк [5] считали строение упорядоченных мультиячейковых и суперячейковых штормов практически одинаковым и предложили классифицировать штормы в зависимости от соотношения диаметра восходящего потока (Ds), и расстояния между центрами соседних восходящих потоков (L). Если L > Ds, то имеет место так называемый «классический» упорядоченный мультиячейковый шторм с дискретным появлением новых радиолокационных ячеек (РЯ). Если L < Ds — это суперячейковый шторм. При $L \sim Ds$ шторм эволюционирует по типу «слабой эволюции», т. е. в этом случае РЯ слабо различимы.

Концепция, в которой была сделана попытка обобщить подходы к типизации, была предложена Футом в работе [6]. В ее основу были положены следующие принципы: по единовременному количеству ячеек в шторме, по времени жизни ячеек, по типу эволюции, по организации ансамбля ячеек и механизму образования зародышей града.

Шон и др. [7], применяя в исследованиях доплеровский радар, предложили морфологическую классификацию *на основе организационного континуума*.

Вайсман и Клемп [8] изучали влияние вертикального сдвига ветра и плавучести на структуру и развитие конвективных штормов с использованием трехмерной численной модели облаков в широком диапазоне условий окружающей среды. Модель способна создавать спектр типов штормов, качественно сходных с наблюдаемыми в природе.

Абшаев и др. в технологии противоградовой зашиты (ПГЗ) [9] предложили типизацию, в которой присутствуют три основных типа штормов: одноячейковые, мультиячейковые и суперячейковые. Используя понятие грозоградовый процесс (ГГП), авторы [9] разделили мультиячейковую группу ГГП на упорядоченные и неупорядоченные процессы в зависимости от пространственной структуры ветра в атмосфере.

Отдельно отметим суперячейки, т. к. они являются самыми мощными в ряду конвективных штормов. Первое описание таких штормов на основе радиолокационных наблюдений было сделано Браунингом [10]. По мере накопления информации суперячейки были разделены на три класса: классические (CL) — Браунинг [10], Лимон и др. [11]; с низким уровнем осадков (LP) — Барджесс и др. [12], Блюштайн и др. [13]; с высоким уровнем осадков (НР) — Досуэлл и др. [14], Моллер и др. [15]. Отнесение суперячеек к разным классам носит, по нашему мнению, не вполне объективный характер. Различие их свойств не всегда очевидно, а сравнительная редкость не позволяет комплексно и объективно изучить этот феномен. Вносят свои коррективы и региональные условия. Встречаются также случаи перехода суперячеек по мере их развития из одного класса в другой: Блюштайн и др. [16], Дэвис-Джонс и др. [17].

В ряде работ (Барджесс и др. [18], Жерард и др. [19], Машико [20]) описываются так называемые *«мини-суперячейки»*, которые отличаются меньшими размерами.

Отметим работы Бетти и др. [21, 22], в которых авторы на основе доплеровских радиолокационных характеристик дают классификацию, позволяющую разделить LP и HP суперячейки.

Новотарский и др. [23, 24], Андерсон-Фрей и др. [25], Штауффер [26] разработали статистический метод самоорганизующейся карты (SOM), что позволило применить его для составления прогнозов условной вероятности несуперячейковых штормов, неторнадических суперячеек (NT), слаботорнадических (WT), суперячеек с торнадо (менее F/EF2 по шкале Фуджита) и значительно торнадических (ST) суперячеек (F/EF2 по шкале Фуджита или выше).

Применение спутников вызвало к жизни много новых технологий. Их использование совместно с радиолокационными и другими натурными наблюдениями позволило не только классифицировать конвективные штормы, мезомасштабные конвективные структуры, но и, что особенно важно, заполнить информационные «лакуны» на континентах и в мировом океане, где не было возможности осуществлять радиолокационное и другое покрытия.

Гуэрова и др. [27], Вэй Джин и др. [28], Гийбэн и др. [29] применили спутниковую информацию и специальное программное обеспечение для анализа и классификации мощных гроз.

Бэнг и др. [30], Брюйк и др. [31] использовали пассивные микроволновые радиометры для селекции из космоса градовых штормов.

В недавней работе Мэрион и др. [32] с помощью новых спутников серии GOES-R была установлена взаимосвязь между шириной восходящего потока конвективного шторма и интенсивностью торнадо.

Попытки классификации конвективных штормов, очевидно, продолжатся. Причина этому, на наш взгляд, состоит в том, что примерно половина всех штормов не вписывается ни в одну из классификаций. Здесь мы имеем в виду не столько морфологию штормов, сколько динамику штормов на протяжении всего их жизненного цикла. Это, на наш взгляд, является следствием того, что в качестве параметров управления по отношению к шторму принимается конвективная неустойчивость тропосферы, структура ветра с высотой и др., свойственные мезо-α-масштабу. Если бы это было верно, то все конвективные штормы в данный период времени и в конкретном регионе были бы «калиброваны» под параметры мезо-α-масштаба. Но этого, как известно, не происходит.

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы показать решающую роль мезо- β -масштабных структур в динамике, «поведении», разнообразии конвективных феноменов, имеющих место одновременно на ограниченных территориях. Влияние мезо- α -масштаба, скорее всего, отражается на уровне возможных экстремальных проявлений конвекции и на преимущественных формах организации мезо- β -масштабных структур.

Исходные материалы и методика исследований

В настоящей работе, как и в [1], мы использовали данные опубликованных работ зарубежных и отечественных исследователей, сопоставляли оригинальные авторские материалы и преобразовывали их с помощью Лагранжевой системы координат (ЛСК), позволяющей исключить маскирующее действие смещения средней тропосферы [33]. В итоге были получены качественно новые результаты, позволяющие интерпретировать известные факты с единых позиций, которые способны не только описать, но и объяснить интересующие нас феномены. Кроме того, мы подробно исследуем один из внутримассовых процессов, данные по которому собирались с помощью АСУ МРЛ [34] в системе ПГЗ Республики Молдова. Частота получения объемных файлов из полусферы радиолокационного обзора пространства составляла 3,5 минуты в течение всего периода наблюдений. Была использована также аэрологическая и синоптическая информация за сроки, наиболее приближенные ко времени рассматриваемых событий.

Основные векторы движения элементов шторма

Многие исследователи изучали векторы движения таких элементов шторма, как его облачная ячейка (в нашей терминологии — радиолокационная ячейка (РЯ) [35, 36]), в виде единого целого. Примеры из работ [3, 37—42] показывают, что в зависимости от направления и скорости обновления, они двигаются по отношению к ведущему потоку по-разному — с замедлением или ускорением.

Рис. 1 иллюстрирует зависимость скорости смещения шторма $(\overline{V_{\rm m}})$ от соотношения скорости воздушного потока на 600 мб поверхности $(\overline{V_{\rm n}})$ и эволюции шторма $(\overline{V_{\rm n}})$:

- замедления шторма $(\overrightarrow{V_{\text{m}}} < \overrightarrow{V_{\text{n}}})$, когда вектор эволюции находится справа и сзади относительно ведущего потока (рис. 1 a—s);
 - примерного равенства скоростей $(\overrightarrow{V_{m}} \approx \overrightarrow{V_{n}})$, (рис. 1 ε);
- превышения скорости шторма над скоростью ведущего потока ($\overrightarrow{V_{\text{m}}} > \overrightarrow{V_{\text{n}}}$), когда вектор эволюции находится справа или справа спереди относительно ведущего потока (рис. 1 ∂ —e);
- редко встречающуюся ситуацию (около 10 % случаев от всех мощных штормов [35, 36]) практического совпадения векторов ведущего потока $(\overrightarrow{V_n})$ и вектора движения шторма $(\overrightarrow{V_n})$. В данном случае это мультиячейковый Raymer-шторм [41, 43];
- отсутствия смещения шторма даже при значительных скоростях внешнего ветра (рис. 1 \mathcal{M}) [42], когда вектор эволюции ($\overrightarrow{V_3}$) противоположен направлению вектора ведущего потока ($\overrightarrow{V_n}$) и равен по скорости ($\overrightarrow{V_n} \approx \overrightarrow{V_3}$).

Результаты исследований соотношений векторов движения в мощных штормах со стационирующим навесом описаны в работах [35, 36]. В них впервые приведены прямые радиолокационные доказательства того, что обновление штормов через фидерные облака происходит в направлении вектора эволюции (\overrightarrow{V}_3) . При этом более чем в 90 % случаев \overrightarrow{V}_3 не совпадает с направлением навеса шторма.

Штормы могут двигаться медленнее или быстрее ведущего потока, влево или вправо от него, против потока или стоять на месте. И это понятно, когда мы

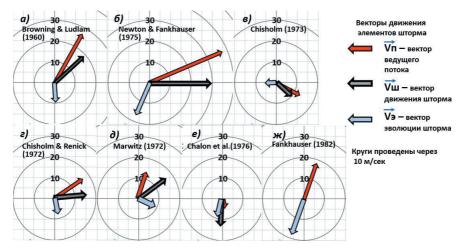


Рис. 1. Примеры векторов движения элементов шторма: [37] (*a*); [38] (*б*); [39] (*в*); [3] (*г*); [40] (*д*); [41] (*e*); [42] (*ж*).

Fig.1 Examples of storm element motion vectors: [37] (*a*); [38] (*b*); [39] (*b*); [3] (*c*); [40] (*d*); [41] (*e*); [42] (\mathcal{H}).

рассматриваем векторы движения отдельно взятого шторма. Случаи, когда штормы одновременно и недалеко друг от друга смещаются в разных направлениях и с разными скоростями или стоят на месте, у неподвижного наблюдателя, находящегося в ЭСК, создают впечатление хаоса. Такие явления чаще всего встречаются при внутримассовых ГГП. В этих случаях, как считают авторы [9], образуются так называемые «одноячейковые» штормы, которые двигаются в поле слабых ветров в разных направлениях и с разными скоростями. Таких ГГП, а также «неупорядоченных» мультиячейковых ГГП, ведущих себя «непредсказуемо», в регионе Северного Кавказа, встречается в 45 % случаев. Обычное объяснение такого рода динамики и кинематики штормов, сводится к влиянию орографии [9]. Мы же, напротив, считаем, что именно в таких ГГП наилучшим образом проявляются ММКЯ и ММКЛ, поведение штормов на элементах которых наиболее предсказуемо, а влияние орографии не является определяющим.

Исходя из результатов, полученных нами в [1], можно констатировать, что структура ветра и сдвиг ветра с высотой не гарантируют единообразия в динамике и кинематике штормов в конкретный день на данной территории. Это означает, что именно отсутствие единообразия проявления различных феноменов ставит под сомнение определяющую роль структуры ветра с высотой.

На рис. 2 полигональные сетчатые структуры представлены схематически в виде шестигранников. Впервые схема реализации конвекции на элементах этих структур была описана в работе [44], а гипотеза о том, что упорядоченная мезомасштабная конвекция в нижней части тропосферы в виде полигональных

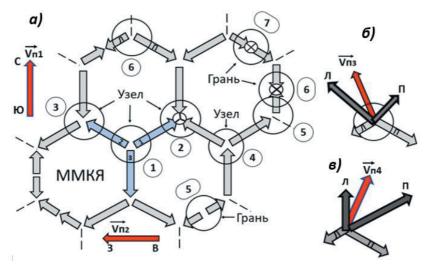


Рис. 2. *а*) Схема полигональной сетчатой структуры конвекции, по элементам которой (*узлам* 1, 2, 3, 4, 5, 6 и *граням* 5, 6, 7) происходит развитие штормов [44]; δ , δ) разделение штормов в узле 6.

Fig. 2. a) Schematic of the mesh convection structure, along the elements of which (*knots* 1, 2, 3, 4, 5, 6 and *edges* 5, 6, 7) the development of storms [44]; δ , δ) splitting of storms at knot 6.

сетчатых структур является запускающим механизмом для глубокой конвекции, высказана ранее в работе [33].

ММКЯ представляют собой циркуляционную систему, в центре которой имеют место нисходящие движения. При этом конвекция, а значит, и осадки, как ее следы в этой области отсутствуют. По внешнему периметру ММКЯ существуют восходящие движения, инициирующие возникновение и развитие конвекции. Структурными элементами внешнего периметра ММКЯ являются узлы и грани. Грани — линейные элементы, которые сходятся в узлах.

Развитие штормов происходит в узлах и на гранях ММКЯ, так как в этих областях в определенное время сосредотачивается «конвективный ресурс», который затем штормами расходуется. В свою очередь, конвективный ресурс пополняется из неустойчивости тропосферы через механизм циркуляции от центра ММКЯ к их граням и узлам. Завершение развития штормов на элементах мезомасштабных структур (диссипация штормов) свидетельствует о том, что конвективный ресурс в конкретном месте исчерпан.

От того, на каком элементе ММКЯ возникает и развивается шторм, зависит кинематика и динамика штормов. Здесь необходимо напомнить, что ММКЯ, ММКЛ или их отдельные фрагменты можно обнаружить, только интегрируя во времени радиоэхо от облаков в ЛСК, т. е. исключая вектор $\overrightarrow{V}_{\rm n}$. Еще следует учитывать, что ММКЯ не всегда проявляются в виде полностью замкнутых полигональных структур, чаще всего мы наблюдаем частично замкнутые структуры. Кроме того, их элементы проявляются не одновременно. На основе многочисленных наблюдений было обнаружено *важнейшее свойство* этих структур: конвекция на элементах ММКЯ или ММКЛ реализуется только один раз за время всего конвективного процесса. Сам конвективный процесс может длиться иногда 10-15 и более часов, и за этот период на указанных элементах структуры ни разу не отмечается повторной конвекции. Этот факт является фундаментальным для построения сверхкраткосрочных прогнозов.

Рассмотрим элементы структуры ММКЯ подробнее (рис. 2). В узлах:

- а) две или три грани могут сходиться (узел 2) феномен слияния и возможной диссипации штормов;
- б) две или три грани могут расходиться (узел 1) феномен разделения штормов;
- в) в узел могут входить две грани, а исходить одна (узел 3) феномен слияния и излома траектории штормов;
- Γ) в узел может входить одна грань, а выходить две (узел 4) феномен разделения и излома траектории штормов;

И еще один феномен, не описанный в работе [44], который мы впервые обнаружили и описали в [1]. Это феномен разделения шторма, при котором один из штормов оставался на месте и продолжал развиваться (рисунки 7 и 8 в [1]). Назовем его феноменом разделения капли (подобно картине отделения капли воды из крана, когда оставшаяся на конце носика крана капля опять втягивается внутрь). Таким образом, имеют место пять возможных вариантов поведения штормов в узлах.

На гранях ММКЯ штормы могут:

- а) расходиться (грань 5) феномен разделения;
- б) сходиться (грань 6) феномен диссипации;
- в) смещаться друг за другом феномен преследования и диссипации одного из штормов (грань 7).

Таким образом, есть три возможных варианта поведения штормов на гранях. В Эйлеровой системе координат (ЭСК), когда наблюдатель неподвижен, может проявляться, по нашим подсчетам, около 120 вариантов основных феноменов. Применение движущейся системы координат (ЛСК), жестко связанной с радиолокационной ячейкой, позволяет типизировать «поведение» штормов и выделить всего 8 вариантов их эволюции на элементах мезомасштабных структур.

На рис. З в качестве примера представлена картина, характерная для расхождения трех штормов из узла 1 (рис. 2 δ) в ЛСК и то, как это же видит неподвижный наблюдатель (ЭСК), когда $\overrightarrow{V}_{\rm n}$ ориентирован с юга на север (рис. 3 ϵ) и когда $\overrightarrow{V}_{\rm n}$ ориентирован с востока на запад (рис. 3 ϵ). Рисунки 3 ϵ и 3 ϵ иллюстрируют образование вектора смещения каждого из штормов.

Сочетание трех параметров: местоположения шторма в структуре ММКЯ, взаимного расположения элементов структуры ММКЯ и вектора ведущего потока, а также скорости эволюции создает собственно структуру ММКЯ, по конфигурации которой можно объяснить любое «поведение» шторма, наблюдаемое с помощью радара, т. е. в ЭСК.

Харрольд [45] предположил, но не объяснил наличие обновлений на противоположных флангах разделившихся штормов. Мы же объясняем этот феномен на примере узла 6 (рис. 2 δ).

Если взять векторы эволюции \overline{V}_3 штормов Л и П (стрелки светло-серого цвета) из рис. 2 a и приложить к ним вектор ведущего потока $\overline{V}_{_{\Pi}}$ (изображен красным), то по правилу сложения векторов получатся результирующие векторы движения левого (Л) и правого (П) штормов (стрелки темно-серого цвета с черной окантовкой). Из этого примера (рис. 2 δ) видно, что левый шторм движется быстрее, чем правый.

На рис. 2 ϵ показано разделение штормов в узле 6, только вектор ведущего потока направлен иначе. В результате правый шторм движется быстрее, чем левый. Из этих двух примеров очевидно, что в зависимости от соотношения сил (в виде $\overrightarrow{V_n}$ и $\overrightarrow{V_s}$), действующих на штормы на разных флангах (левом и правом), мы получаем различные типы их движения после разделения. Такое объяснение применимо к случаям разделения и суперячейковых, и мультиячейковых штормов при любых годографах. Таким образом, мы объясняем и другие аспекты этого феномена, а именно: ускорение или замедление движения штормов по траектории, углы расхождения штормов, соотношение скоростей расходящихся штормов и т.д., не привлекая при этом классическую теорию механизма их разделения [46, 47].

Теперь обратимся к ГГП от 22.06.2019 в Республике Молдова, фрагмент которого, касающийся разделения шторма, обсуждался в [1]. Здесь рассмотрим

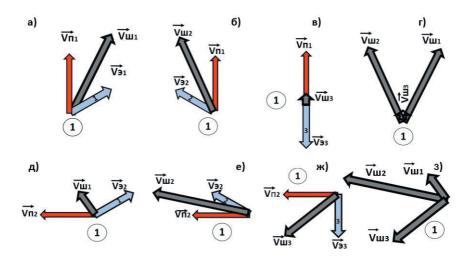


Рис. 3. Картина смещения штормов в ЭСК ($\overrightarrow{V_{\text{m}}}$ — серый вектор) для двух положений вектора ведущего потока ($\overrightarrow{V_{\text{n}}}$ — красный вектор) относительно одного из структурных элементов ММКЯ, а именно из узла 1 (обозначение узла выделено маленьким кругом): первое положение $\overrightarrow{V_{\text{n}}}$ с юга на север (a, b, b), второе — с востока на запад (b, b, b) и b) картина расхождения штормов ($\overline{V_{\text{H}}}$ 1, $\overline{V_{\text{H}}}$ 2, $\overline{V_{\text{H}}}$ 3) в ЭСК из узла 1 при двух положениях $\overline{V_{\text{n}}}$.

Fig. 3 The picture of storm displacement in the ESC ($\overrightarrow{V}_{\text{III}}$ — gray vector) for two positions of the leading flux vector ($\overrightarrow{V}_{\text{II}}$ — red vector) relative to one of the structural elements of the MMKC, namely from node 1 (the node designation is highlighted by a small circle): the first position $\overrightarrow{V}_{\text{II}}$ — from south to north (a, δ , e), the second — from east to west (∂ , e, ∞): ε) and ε) the picture of storm displacement ($\overrightarrow{V}_{\text{III}}$ 1, $\overrightarrow{V}_{\text{III}}$ 2, $\overrightarrow{V}_{\text{III}}$ 3) in the ESC from node 1 at two positions $\overrightarrow{V}_{\text{II}}$.

динамику проявления мезомасштабных конвективных структур в виде ММКЯ и ММКЛ.

На рис. 4 путем интегрирования осадков за период около 9 часов представлена карта, на которой видны ММКЯ и ММКЛ (эти структуры в качестве примера указаны стрелочками). Общее количество обнаруженных ММКЯ в этот день составило 33, а ММКЛ — более 10-ти (привлечены данные шести радаров, которые расширили зону обзора почти вдвое). Напомним, что размер ММКЯ определяется диаметром круга, равным по площади внутренней области ММКЯ [1].

В табл. 1 сравниваются спутниковые данные, в которых представлено распределение размеров открытых ММКЯ, данные радиолокационных наблюдений за 46 ГГП в Молдове [33] и данные, полученные нами при анализе ГГП от 22.06.2019 в Республике Молдова. Максимумы всех трех распределений приходятся на диаметр ММКЯ, равный 30—40 км, и составляют 47, 37 и 43 % соответственно. В целом, можно констатировать неплохое совпадение распределений, а небольшие отличия мы связываем с ограниченным количеством ММКЯ, имевших место за один ГГП.

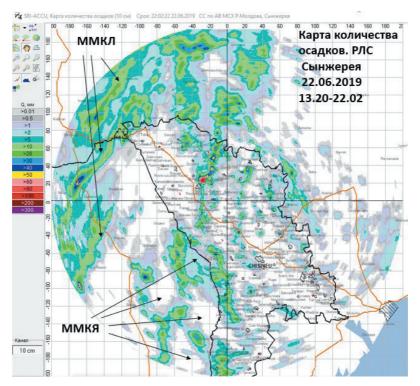


Рис. 4. Карта количества осадков по данным РЛС Сынжерея от 22.06.2019 (Республика Молдова).

Стрелками обозначены некоторые мезомасштабные конвективные ячейки (ММКЯ) и мезомасштабные конвективные линии (ММКЛ).

Fig. 4. Map of precipitation according to the radar Singerei from 22.06.2019. Republic of Moldova.

The arrows indicate some Meso Scale Convective Cells (MSCC) and Meso Scale Convective Lines (MSCL).

Таблица 1

Повторяемость размеров мезомасштабных конвективных ячеек (ММКЯ) (в %) по спутниковым и радиолокационным данным из работы [33] и по радиолокационным данным от 22.06.2019

The repeatability of the Meso Scale Convective Cells (MSCC) size (in %) according to satellite and radar data from [33] and radar data from 22.06.2019

Данные	Диаметр ММКЯ (км)								
	10-20	20-30	30-40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90	90—100
спутников	5	21	47	21	3	1	0,8	0,4	0,8
РЛС	9	24	37	17	7	3,2	2	0,6	0,2
от 22.06.2019	6	28	43	17	6				

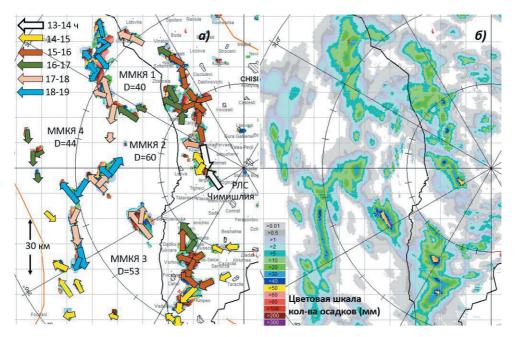


Рис. 5. Развитие мезомасштабных конвективных ячеек (ММКЯ) 22.06.2019 (Молдова, Радар Чимишлия):

a) в виде векторов эволюции (радиоэхо с Z ≥ 45dbZ); δ) карта суммарных осадков с 13.43 по 19.43. D — диаметр ММКЯ (км).

Fig. 5. Evolution of mesoscale convective cells (MSCC) 22.06.2019 (Moldova, Radar Cimislia): a) as evolution vectors (radio echo with $Z \ge 45$ dbZ); δ) map of total precipitation from 13.43 to 19.43. D — diameter of MSCC (km).

На рис. 5 σ представлена картина осадков за весь ГГП, и эта же картина в ЛСК на рис. 5 σ . Цвета стрелок меняются в зависимости от времени существования тех или иных штормов. Здесь мы четко видим, что есть области, в которых осадки за весь период не отмечались (внутренние области ММКЯ, где имеют место нисходящие дивергентные воздушные потоки) и по краям, в зонах конвергенции восходящих воздушных потоков (мы называем эти области «гранями» и «узлами») почти везде отмечались осадки с различной интенсивностью. Размеры ММКЯ представлены на рис. 5 σ . Конвекция началась около 13 часов (здесь и везде время местное) на востоке ММКЯ 2, затем, к 14 часам обозначилась южная периферия ММКЯ 3, а далее процесс проявления структур шел в основном с юго-востока на северо-запад. Некоторые детали ММКЯ дополнялись в течение всего периода.

В картине развития штормов отмечаются разные феномены, о которых речь шла выше: слияние, разделение, изломы траекторий штормов, преследование штормов, диссипация и т.д. Необходимо отметить, что в приводимых примерах ММКЯ 1—4, скорости эволюции по их элементам были в пределах 10—15 км/ч.

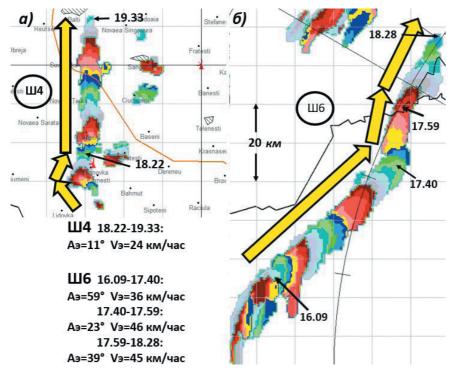


Рис. 6. Траектории штормов вдоль ММКЛ ($Z \ge 45 \text{ dbZ}$, H = 5 км). ГГП за 22.06.2019 (Молдова). Частота обзора и смены цветов — 3,5 мин. Fig. 6. Storm trajectories along the MMCL ($Z \ge 45 \text{ dbZ}$, H = 5 km). TSP for 22.06.2019 (Moldova). Review and color change frequency — 3.5 min.

Важной особенностью ММКЯ является неодновременность проявления элементов структуры. По этой причине ММКЯ можно обнаружить, только интегрируя изображения радиоэха в течение какого-либо периода и по мере проявления структуры, имея определенные навыки прогнозировать не только конфигурацию элементов ММКЯ, но и время существования того или иного шторма, усиление или ослабление, место и время его разрушения и т.п.

На рис. 6 изображен фрагмент ГГП за 22.06.2019 в Молдове, где показаны траектории двух штормов: Ш4, о котором упоминалось в [1], и Ш6, развивавшийся в предгорной части Карпат в Румынии. Шторм 4, от момента 1-го радиоэха до полной диссипации просуществовал 170 мин, шторм 6 — 165 мин. Оба шторма испытывали изломы траектории. На разных прямолинейных участках они имели разные скорости эволюции, которые менялись от 24 (Ш4) до 46 км в час (Ш6). Если предположить, что центры ячеек, которые формировали картину эволюции этих штормов, располагались примерно в 6 км друг от друга (средний диаметр радиолокационных ячеек), то для Ш4, прошедшего расстояние 37 км, было 6 обновлений (5 ячеек в час), для Ш6 на разных прямолинейных участках таких

обновлений было в сумме 13 (5,6 ячеек в час). Примерно такая же частота обновлений имела место и для других ММКЛ в этот день. Этот параметр у нас для ММКЛ несколько выше, чем в мультиячейковых и суперячейковых штормах при фронтальных процессах, когда она составляет величину от 3 до 4 в час, т. е. каждые 15—20 мин. Однако, мы пока не располагаем достаточной статистикой, которая смогла бы достоверно описать возможные различия в этом параметре для разных синоптических процессов.

Можно сравнить наши оценки с результатами, полученными в работе [48], в которой подробно представлен спектр скоростей эволюции 248 штормов в южной Бразилии. Приведем только два факта: средняя частота обновлений на элементах ММКЯ у нас равна двум в час, в южной Бразилии повторяемость этого параметра составляет 33 %; средняя частота обновления на ММКЛ у нас составляет около пяти в час, в южной Бразилии повторяемость таких частот обновления составляет 22 %. Из этого сравнения можно заключить, что повторяемость указанных выше частот обновления (а значит и скоростей эволюции) при внутримассовых процессах довольно внушительная: от 22 % для ММКЯ до 33 % для ММКЛ.

В работах [35, 36] нами показано, что регионы Северного Кавказа и Молдовы сравнимы с регионом южной Бразилии по спектру мощных градовых штормов. Эти полученные нами повторяемости частот обновлений и скоростей эволюции штормов на элементах ММКЯ и ММКЛ могут служить ориентиром в дальнейших исследованиях. Учет этого параметра — частоты обновлений для штормов, развивающихся на элементах ММКЯ или ММКЛ при разных типах ГГП (при внутримассовых или фронтальных) — имеет прямое отношение к технологии противоградовой зашиты, т. к. частота циклов засева обновляющейся части штормов кристаллизующими реагентами линейно зависит от частоты обновления штормов.

Обсуждение полученных результатов и их сопоставление с концепцией разделения конвективных штормов

При рассмотрении известной классической концепции разделения мощных конвективных штормов [46, 47] в сопоставлении с опубликованными в литературе данными, а также с результатами наших исследований, возникает ряд следующих вопросов:

- 1. Авторы концепции считают, что горизонтальный вращающийся вихрь будет приподниматься набегающим восходящим потоком с последующим образованием дуги и т.д., в то время как набегающий восходящий поток может просто сверху обтекать горизонтальный вихрь, и все последующие стадии, ведущие к разделению шторма, не реализуются. Действительно, для набегающего восходящего потока горизонтальный вихрь является препятствием, преодолеть которое он может сверху, подобно тому, как теплый воздух при сближении с холодным фронтом не приподнимает его, а скользит поверх него. На каком основании, в таком случае, авторы концепции решили, что вихрь приподнимается восходящим потоком?
- 2. В суперячейковых или мощных мультиячейковых штормах восходящие и нисходящие потоки разнесены: восходящие существуют в области слабого радиоэха

(под навесом радиоэха), и величина этих потоков достигает 30—40 м/сек и больше; нисходящие — далеко в тылу радиоэха и их величина — также десятки м/сек. Таким образом, в районе навеса радиоэха, где исключено выпадение осадков, отсутствует механизм разделения шторма. В тыловой части штормов, где происходит обрушение осадков, условия разделения штормов существуют, однако почему авторы концепции утверждают, что попадание в эту область вращающейся дуги приведет к разделению ее на две половины, в то время как мощные нисходящие движения могут подавить всю дугу полностью?

3. Если предположить, что вращающаяся дуга, достигшая области осадков, разделится пополам, то почему авторы концепции считают, что в условиях отсутствия восходящих потоков процесс развития разделившихся штормов продолжится?

Если мы все же примем за основу изложенную концепцию, то и в этом случае возникает ряд вопросов:

- 4. Почему после первого акта разделения шторма по мере поступления в него новых облачных ячеек через фидерные облака не происходит разделения шторма с частотой 15—20 мин (средняя частота поступления фидерных ячеек в штормы)?
- 5. Почему не разделяются все суперячейки, находящиеся в сходных условиях в данный день? А при наличии сходных условий в разные дни?
- 6. Почему штормы, вращающиеся циклонически или антициклонически, иногда в процессе движения меняют свое отклонение от ведущего потока с левого на правое и наоборот. Означает ли это, что они поменяли свое вращение на противоположное? Если да, то почему это произошло без разделения шторма? А если не поменяли вращение, то почему?
- 7. Каким образом разнонаправленность траекторий разделившихся штормов сохраняется длительное время, если параметры мезо-α-масштаба (например, годограф), обуславливают либо циклоническое, либо антициклоническое вращение?
- 8. Теория утверждает, что разделяются только вращающиеся штормы, т. е. суперячейки, однако почему тогда встречаются случаи разделения явно не суперячеек? (Примеры на рисунках 3 и 4 e [1]), а также из данных других авторов [49—51].)

Ответы на указанные вопросы сформулированы ниже:

- 1—3. В самой фабуле взаимодействия восходящего потока и горизонтального ролла много искусственных предположений, которые требуют более детального натурного подтверждения. Мы не отрицаем того, что во многих случаях с помощью доплеровских измерений подтверждено циклоническое и антициклоническое вращение в отделившихся штормах. В некоторых случаях разделялись и мультиячейковые штормы, в которых вращения потоков не происходило. Это означает, что вращение потоков внутри штормов не является обязательным условием их разделения. Подтверждением этому является ГГП от 18.06.2016 в Молдове [1], когда мультиячейковый шторм разделился, и более чем через час один из отделившихся штормов стал суперячейкой.
- 4. Этот пункт представляется особенно важным, так как он затрагивает саму суть существования шторма, как процесса непрерывного обновления. Нами

показано [35, 36], что обновление штормов происходит в направлении вектора эволюции и совпадает с фидерными ячейками, которые обновляют шторм в среднем каждые 15—20 мин. Именно так и должно было бы происходить разделение штормов, однако этого не наблюдается. Вероятно, сравнительная редкость самого феномена разделения штормов указывает нам на то, что это явление возникает в особых условиях, пока еще не вполне изученных. Нет тонких исследований, в которых бы подробно разбирался и сам процесс разделения штормов. Такие данные смогли бы подтвердить или опровергнуть упомянутые выше положения концепции разделения штормов. В приведенных нами примерах показано, что все разделения штормов связаны с узлами мезомасштабных структур ММКЯ или их фрагментов, где узлы, а, значит, изломы четко просматриваются.

- 5. Если бы на различные феномены, которые мы наблюдаем в конвективных штормах, влиял мезо-α-масштаб, то все штормы вели бы себя одинаково, но этого не происходит. Мы показали, что от взаимного расположения элементов ММКЯ или ММКЛ, направления и скорости ветра в средней тропосфере зависит возможная реализация самых разнообразных феноменов и их комбинаций. При этом конфигурация и величина сдвига ветра, относящиеся к свойствам мезо-α-масштаба, не играют определяющей роли. По нашим представлениям, факторы мезо-α-масштаба ответственны за форму реализации мезо-β-масштабных полигональных или линейных структур. В то же время интенсивность конвекции и ее экстремальные проявления в виде суперячеек или мощных мультиячейковых штормов во многом зависят именно от структуры ветра с высотой и параметров неустойчивости атмосферы.
- 6. Феномен смены отклонения траектории отделившихся штормов с левого на правый и наоборот теория не может объяснить, так как в этих случаях отсутствует разделение штормов (рисунки 3 и 4 в [1]). Мы объясняем его простым переходом штормов с одной грани ММКЯ (или ее фрагмента) на другую. Переориентация траекторий при этом связана с тем, что эти грани располагаются под некоторым углом друг к другу.
- 7—8. Сохранение отклонения траекторий штормов влево или вправо от ведущего потока в течение иногда многих часов теория не объясняет. Мы объясняем этот феномен наличием самих мезомасштабных структур, по граням и узлам которых эти штормы обновляются, а грани и узлы являются зонами конвергенции восходящих потоков. Штормы диссипируют там, где отсутствуют условия конвекции, т.к. на гранях и узлах мезомасштабных структур конвекция ранее уже проявлялась, и конвективный ресурс исчерпан.

Таким образом, факт существования случаев разделения мультиячейковых итормов не объясняется обсуждаемой теорией. Наш подход, определяющий механизм влияния мезо-β-масштаба, напротив, не только объясняет этот феномен, но и не делает различий между механизмами разделения мультиячейковых и суперячейковых штормов. Мы считаем, что феномен разделения конвективных штормов объясняется обновлением на разных флангах: для всех типов штормов разделение происходит по расходящимся граням ММКЯ или ММКЛ. Различные варианты соотношения скоростей разделившихся штормов и углов их расхождения

связаны лишь с разной взаимной ориентацией элементов мезо- β -масштабных структур по отношению к вектору внешнего ветра \overrightarrow{V}_n .

Выводы

Проведенное нами исследование феномена разделения штормов привело к необходимости описать многие другие феномены: диссипацию штормов, изломы траекторий, слияние штормов, различные скорости движения штормов, скорости их эволюции и т.п.

Применяя Лагранжев подход, например, в системе ПГЗ (Процедура Лагранжа в АСУ-МРЛ), мы получаем возможность в 15 раз (со 120 до 8) снизить количество вариантов отображения развития радиолокационных событий, а также число соответствующих прогностических решений и последующих оперативных действий.

Анализ известной теории разделения штормов в сопоставлении с фактами из зарубежной литературы и нашими исследованиями привел к следующим выводам:

- 1. Теория разделения штормов [46, 47] не может ответить на ряд важных вопросов, которые возникают при рассмотрении механизмов разделения штормов, не объясняет последствия таких разделений и часто вступает в противоречие с наблюдаемыми фактами.
- 2. Рассмотренные феномены впервые объясняются нами с единых позиций, связанных с положением и развитием штормов на элементах мезомасштабных структур в зависимости от взаимного расположения этих элементов по отношению к средне-тропосферным ветрам.
- 3. Впервые описан ранее не отмеченный феномен разделения мощных конвективных штормов, названный нами феноменом «разделения капли», когда один из разделившихся штормов, оставаясь в узле, продолжает развиваться и усиливаться, а другой отделившийся шторм смещается вдоль одной из граней ММКЯ. Таким образом, мы наблюдаем разделение шторма, но не наблюдаем расхождения траекторий штормов.
- 4. Закономерности развития штормов на элементах мезомасштабных структур позволяют осуществлять оперативное прогнозирование различных параметров штормов и мезомасштабных структур в целом применительно к технологиям ПГЗ, активных воздействий (АВ) на конвективные облака с целью перераспределения осадков и для штормоповещения населения.

В дальнейшем нами планируются исследования отдельных элементов структур ММКЯ и ММКЛ с целью описания и обобщения как уже известных, получивших апробацию в реально наблюдаемых процессах, так и новых прогностических предикторов. Их применение позволит существенно улучшить качество оперативных сверхкраткосрочных прогнозов, применяемых в работах по АВ на конвективную облачность, в штормоповещении, в обслуживании различных сфер народного хозяйства.

В заключение хотелось бы поблагодарить Гарабу И.А. за предоставленные материалы; Корнеева В.П., Щукина Г.Г. и Бычкова А.А. за всемерное содействие в проведении исследований и публикации их результатов.

Список литературы

- 1. *Лившиц Е.М., Петров В.И.* Разделение конвективных штормов. Часть І. Динамика и кинематика // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 648—670. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670
- Orlanski I. A rational division of scales for atmospheric processes // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1975. Vol. 56. P. 527—530.
- 3. *Chisholm A.J., Renick J.H.* The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. Alberta Hail Studies 1972. Research Council of Alberta // Hail Studies Report. 1972. № 72-2. P. 24—31.
- 4. Vasiloff V.V., Brandes E.A., Davies-Jones R.P. An investigation of the transition from multicell to supercell storms // Journal of Climate and applied meteorology. 1986. № 25. P. 1022—1036. doi: 10.1175/1520-0450(1986)025<1022:AIOTTF>2.0.CO;2.
- 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: 10.1175/15200469(1983)040<0686:CSO-AHI>2.0.CO;2.
- Foot G.B. Aspects of cumulonimbus classification relevant to hail problem // J. Res. Atmos. 1985.
 Vol. 19. P. 61—74.
- 7. Schoen J.T. Ashley W.S. A Climatology of Fatal Convective Wind Events by Storm Type // Weather and Forecasting. 2011. Vol. 26. P. 109—121. doi: 10.1175/2010WAF2222428.1.
- 8. 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, № 6. P. 504—520. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2.
- 9. *Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Барекова М.В., Малкарова А.М.* Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик, 2014. 500 с.
- 10. 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.
- 11. Lemon L.R., Doswell III C.A. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis // Mon. Wea. Rev. 1979. Vol. 107, № 118. P. 1184—1197. doi: 10.1175/1520-0493 (1979)107<1184:STEAMS>2.0.CO;2.
- 12. Burgess D.B., Davies-Jones R.P. Unusual tornadic storms in eastern Oklahoma on 5 December 1975 // Mon. Wea. Rev. 1979. Vol. 107. P. 451—457. doi: 10.1175/1520-0493(1979)107<0451:UTSIEO>2.0. CO;2.
- 13. Bluestein H.B., Parks C.R. A synoptic and photographic climatology of low precipitation severe thunderstorms in the Southern Plains // Mon. Wea. Rev. 1983. Vol. 111. P. 2034—2046. doi: 10.1175/1520-0493(1983)111<2034:ASAPCO>2.0.CO;2.
- Doswell C.A., Moller A.R., Przybylinski R. A unified set of conceptual models for variations on the supercell theme. Preprints. 16th Conf. Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB. Canada // Amer. Meteor. Soc. 1990. P. 40—45.
- 15. Moller A.R., Doswell III C.A., Foster M.P., Woodall G.R. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures // Wea. Forecasting. 1994. Vol. 9. P. 327—347. doi: 10.1175/15200434(1994)009<0327:TOROST>2.0.CO;2.
- 16. Bluestein H.B., Woodall G.R. Doppler-radar analysis of a low precipitation severe storm // Mon. Wea. Rev. 1990. № 118. P. 1640—1664. doi: 10.1175/15200493(1990)118<1640:DRAOAL>2.0.CO;2.
- 17. *Davies-Jones R.P., Burgess D.W., Lemon L.R.* An atypical tornado producing cumulonimbus // Weather. 1976. 31. P. 336—347. doi: 10.1002/j.1477-8696.1976.tb07449.x.
- 18. Burgess D.W., Lee R.R., Parker S.S., Floyd D.L., Andra D.I. A study of mini supercells observed by WSR-88D radars. Preprints 27th Conf. On Radar Meteorology. Vail. CO // Amer. Meteor. Soc. 1995. P. 4—6.
- 19. *Gerard A.E., G.R. Garrett, C. Morgan.* An overview of a cool season tornadic supercell over central Mississippi. Nat. // Wea. Assoc. Electronic Journal. 2000. 2000-EJ2.
- 20. Mashiko W., Niino H., Kato T. Numerical Simulation of Tornadogenesis in an Outer-Rainband Minisupercell of a Typhoon Shanshan on 17 September 2006 // Mon. Wea. Rew. 2009. Vol. 137. P. 4238—4260. doi: 10.1175/2009MWR2959.1.

- 21. Beatty K., Rassmussen E.N., Straka J.M. The Supercell Spectrum. Part I: A Review of Research Related to Supercell Precipitation Morphology // Journal of Severe Storms Meteorology. 2008. № 3 (4). P. 1—21.
- 22. Beatty K., Rassmussen E.N., Straka J.M., Lemon L.R. The Supercell Spectrum. Part II: A Semi-Objective Method for Radar Classification of Supercell Type // Journal of Severe Storms Meteorology. 2009. № 4 (1). P. 1—30.
- 23. Nowotarski C.J., Jensen A.A. Classifying proximity soundings with self-organizing maps toward improving supercell and tornado forecasting // Wea. Forecasting. 2013. № 28. P. 783—801. doi: 10.1175/WAF-D-12-00125.1.
- 24. *Nowotarski C.J., Jensen A.A.* Multivariate Self-Organizing Map Approach to Classifying Supercell Tornado Environments Using Near-Storm, Low-Level Wind and Thermodynamic Profiles // Wea. Forecasting. 2018. № 33. P. 661—670. doi: 10.1175/WAF-D-17-0189.1.
- 25. Anderson-Frey A.K., Richardson Y.P., Dean A.R., Thompson R.L., Smith B.T. Self-organizing maps for the investigation of tornadic near-storm environments // Wea. Forecast. 2017. № 32. P. 1467—1475. doi: 10.1175/WAF-D-17-0034.1.
- 26. Stauffer R.M., Thompson A.M., Young G.S. Tropospheric ozonesonde profiles at long-term u. S. monitoring sites: 1. A climatology based on self-organizing maps // J. Geophys. Res. Atmos. 2016. № 121. P. 1320—1329. doi: 10.1002/2015JD023641.
- 27. Guerova G., Dimitrova T., Georgiev S. Thunderstorm Classification Functions Based on Instability Indices and GNSS IWV for the Sofia Plain // Remote Sensing. 2019. № 11(24). P. 1—17. doi: 10.3390/rs11242988.
- 28. *Jin W., Gong F., Zeng X., Fu R.* Classification of Clouds in Satellite Imagery Using Adaptive Fuzzy Sparse Representation December // Sensors. 2016. № 16(12). P. 1—15. doi: 10.3390/s16122153.
- 29. *Gijben M., Coning E.* Using Satellite and Lightning Data to Track Rapidly Developing Thunderstorms in Data Sparse Regions // Atmosphere. 2017. Vol. 8, № 16. P. 1—15. doi: 10.3390/atmos8040067.
- 30. Bang S.D., Cecil D.J. Constructing a Multifrequency Passive Microwave Hail Retrival and Climatology in the GPM Domain // J. Appl. Met. and Clim. 2019. № 58(9). P. 1889—1904. doi: 10.1175/JAMC-D-19-0042.1.
- 31. Bruick Z.S., Rasmussen K.L., Cecil D.J. Subtropical South American hailstorm characteristics and environments // Mon. Wea. Rev. 2019. № 147. P. 4289—4304. doi: 10.1175/MWR-D-19-0011.1.
- 32. Marion G.R., Trapp R.J., Nesbitt S.W. Using overshooting top area to discriminate potential for large, intense tornadoes // Geophys. Res. Lett. 2019. № 46. P. 12520—12526. doi: 10.1029/2019GL084099.
- 33. 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.
- 34. 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 «Радиолокац. исследования природных сред». СПб., 2011. С. 211—225.
- 35. Лившиц Е.М., Петров В.И. Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть І. Основные векторы движения и их соотношение в мощных градовых штормах // Доклады ВОК по ФО и АВ на Гидромет. Процессы. Нальчик, 2021. С. 192—198.
- 36. *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. Проц. Нальчик, 2021. С. 198—204.
- 37. *Browning K.A., Ludlam F.H.* Radar analysis of a hailstorm. Tech. Note No. 5 // Dept. of Meteorology. Imperial College. London, 1960. P. 106.
- 38. *Newton C.W., Fankhauser J.C.* Movement and propagation of multicellular convective storms // Pure Appl. Geophys. 1975. № 113. P. 747—764. doi: 10.1007/BF01592957.
- 39. *Chisholm A.J.* Radar case studies and airflow models. Alberta Hailstorms // Meteor. Mon. 26. Amer. Meteor. Soc. 1973. P. 1—36. doi: 10.1007/978-1-935704-32-4.
- 40. *Marwitz J.D.* The structure and motion of severe hailstorms. Part II: Multi-cell storm // J. Appl. Meteor. 1972. № 11. P. 180—188. doi: 10.1175/1520-0450(1972)011 %3C0180:TSAMOS %3E2.0.CO.
- 41. Chalon J.-P., Fankhauser J.C., Eccles P.J. Structure of an evolving hailstorm. Part I: General characteristic and cellular structure // Man. Wea. Rev. 1976. № 104. P. 564—575. doi: 10.1175/1520-0493 (1976)104<0564:SOAEHP>2.0.CO;2.

- 42. Fankhauser J.C. Hail Storms of the Central High Plains. Vol. 2. Part I: 22 June 1976 case study a complex multicellular hail and rainstorm. Chap. 13: Large-scale influences, radar echo structure and mesoscale circulations // C. Knight. P. Squires. Eds. Colorado Assoc. University Press. 1982.
- 43. Browning K.A., Fankhauser J.C., Chalon J.P., Eccles P.J., Strauch R.G., Merrem F.H., Musil D.J., Mav E.L., Sand W.R. Structure of an Evolving Hailstorm, Part V; Synthesis and Implications for Hail Growth and Hail Suppression // Monthly Weather Rev. 1976. № 104. P. 603—610. doi: 10.1175/1520-0493(1976)104<0603:SOAEHP>2.0.CO;2.
- 44. Старостин А.Н. Классификация типов эволюции кучево-дождевых облаков // Активное воздействие на атмосферные процессы в Молдове. 1992. Вып. 3. С. 58—74.
- 45. *Harrold, T.W.* Notes on Thunderstorm Motions, Heights and Circulations // ESSA Technical Memorandum IERTM-NSSL-29. 1966. P. 1—8.
- 46. *Rotunno R*. On the evolution of thunderstorm rotation // Mon. Weather Rev. 1981. № 109. P. 171—180. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
- 47. *Klemp J.B.* Dynamics of tornadic thunderstorms // Ann. Rev. Fluid Mech. 1987. № 19. P. 369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.
- 48. 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.
- 49. *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. P. 89—94.
- 50. *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, № 3. P. 191—213. doi: 10.2151/JMSJ1965.49.3 191.
- 51. Wang C., Tai-Jen Chen G., Yang S., Tsuboku K. Wintertime Supercell Thunderstorms in a Subtropical Environment: Numerical Simulation // J. Monthly Weather Review. 2009. Vol. 137, № 7. P. 2175—2202. doi: 10.1175/2008MWR2616.1.

References

- 1. *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 Russian].
- Orlanski I. A rational division of scales for atmospheric processes. Bull. Amer. Meteor. Soc. 1975, 56: 527—530.
- 3. *Chisholm A.J., Renick J.H.* The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. Alberta Hail Studies 1972. Research Council of Alberta. Hail Studies Report. 1972, 72-2: 24—31.
- 4. Vasiloff V.V., Brandes E.A., Davies-Jones R.P. An investigation of the transition from multicell to supercell storms. J. of Climate and applied meteorology. 1986, 25: 1022—1036. doi: 10.1175/1520-0450(1986)025<1022:AIOTTF>2.0.CO;2.
- 5. 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: 10.1175/15200469(1983)040<0686:CSOA-HI>2.0.CO:2.
- 6. Foot G.B. Aspects of cumulonimbus classification relevant to hail problem. J. Res. Atmos. 1985, 19: 61—74.
- 7. Schoen J.T., Ashley W.S. A Climatology of Fatal Convective Wind Events by Storm Type. Wea. and For. 2011, 26: 109—121. doi: 10.1175/2010WAF2222428.1.
- 8. Weisman M.L, Klemp J.B. The Dependence of Numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy. Mon. Wea. Rev. 1982, 110, 6: 504—520. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2.
- 9. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Barekova M.V., Malkarova A.M. Rukovodstvo po organizazii i provedeniyu protivogradovykh rabot. Guidelines for organizing and conducting anti-hail operations. Nalchik, 2014: 500 p. [In Russian].
- 10. 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:AAPT WS>2.0. CO;2.

- 11. Lemon L.R., Doswell III C.A. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. Mon. Wea. Rev. 1979, 107, 118: 1184—1197. doi: 10.1175/1520-0493 (1979)107<1184:STEAMS>2.0.CO;2.
- 12. Burgess D.B., Davies-Jones R.P. Unusual tornadic storms in eastern Oklahoma on 5 December 1975. Mon. Wea. Rev. 1979, 107: 451—457. doi: 10.1175/1520-0493(1979)107<0451:UTSIEO>2.0. CO;2 13.
- 13. Bluestein H.B., Parks C.R. A synoptic and photographic climatology of low precipitation severe thunderstorms in the Southern Plains. Mon. Wea. Rev. 1983, 111: 2034—2046. doi: 10.1175/1520-0493 (1983)111<2034:ASAPCO>2.0.CO;2.
- Doswell C.A., Moller A.R., Przybylinski R. A unified set of conceptual models for variations on the supercell theme. Preprints. 16th Conf. Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB. Canada. Amer. Meteor. Soc. 1990: 40—45.
- 15. Moller A.R., Doswell III C.A., Foster M.P., Woodall G.R. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. Wea. For. 1994, 9: 327—347. doi: 10.1175/15200434 (1994)009<0327:TOROST>2.0.CO;2.
- 16. Bluestein H.B, Woodall G.R. Doppler-radar analysis of a low precipitation severe storm. Mon. Wea. Rev. 1990, 118: 1640—1664. doi: 10.1175/15200493(1990)118<1640:DRAOAL>2.0.CO;2.
- 17. *Davies-Jones R.P., Burgess D.W., Lemon L.R.* An atypical tornado producing cumulonimbus. Weather. 1976, 31: 336—347. doi: 10.1002/j.1477-8696.1976.tb07449.x.
- Burgess D.W., Lee R.R., Parker S.S., Floyd D.L., Andra D.I. A study of mini supercells observed by WSR-88D radars. Preprints 27th Conf. On Radar Meteorology. Vail. CO. Amer. Meteor. Soc. 1995: 4—6.
- 19. *Gerard A.E., Garrett G.R., Morgan C.* An overview of a cool season tornadic supercell over central Mississippi. Nat. Wea. Assoc. Electronic Journal. 2000, 2000-EJ2.
- 20. *Mashiko W., Niino H., Kato T.* Numerical Simulation of Tornadogenesis in an Outer-Rainband Minisupercell of a Typhoon Shanshan on 17 September 2006. Mon. Wea. Rew. 2009, 137: 4238—4260. doi: 10.1175/2009MWR2959.1.
- 21. *Beatty K., Rassmussen E.N., Straka J.M.* The Supercell Spectrum. Part I: A Review of Research Related to Supercell Precipitation Morphology. Journal of Severe Storms Meteorology. 2008, 3 (4): 1—21.
- Beatty K., Rassmussen E.N., Straka J.M., Lemon L.R. The Supercell Spectrum. Part II: A Semi-Objective Method for Radar Classification of Supercell Type. Journal of Severe Storms Meteorology. 2009, 4 (1): 1—30.
- Nowotarski C.J., Jensen A.A. Classifying proximity soundings with self-organizing maps toward improving supercell and tornado forecasting. Wea. Forecasting. 2013, 28: 783—801. doi: 10.1175/ WAF-D-12-00125.1.
- 24. Nowotarski C.J., Jensen A.A. Multivariate Self-Organizing Map Approach to Classifying Supercell Tornado Environments Using Near-Storm, Low-Level Wind and Thermodynamic Profiles. Wea. Forecasting. 2018, 33: 661—670. doi: 10.1175/WAF-D-17-0189.1.
- Anderson-Frey A.K., Richardson Y.P., Dean A.R., Thompson R.L., Smith B.T. Self-organizing maps for the investigation of tornadic near-storm environments. Wea. Forecasting. 2017, 32: 1467—1475. doi: 10.1175/WAF-D-17-0034.1.
- Stauffer R.M., Thompson A.M., Young G.S. Tropospheric ozonesonde profiles at long-term u. S. monitoring sites: 1. A climatology based on self-organizing maps. J. Geophys. Res. Atmos. 2016, 121: 1320—1329. doi: 10.1002/2015JD023641.
- Guerova G., Dimitrova T., Georgiev S. Thunderstorm Classification Functions Based on Instability Indices and GNSS IWV for the Sofia Plain. Remote Sensing. 2019, 11(24): 1—17. doi: 10.3390/rs11242988.
- 28. *Jin W., Gong F., Zeng X., Fu R.* Classification of Clouds in Satellite Imagery Using Adaptive Fuzzy Sparse Representation December. Sensors. 2016, 16(12): 1—15. doi: 10.3390/s16122153.
- 29. *Gijben M., Coning E.* Using Satellite and Lightning Data to Track Rapidly Developing Thunderstorms in Data Sparse Regions. Atmosphere. 2017, 8, 16: 1—15. doi: 10.3390/atmos8040067.
- 30. Bang S.D., Cecil D.J. Constructing a Multifrequency Passive Microwave Hail Retrival and Climatology in the GPM Domain. J. Appl. Met. and Clim. 2019, 58(9): 1889—1904. doi: 10.1175/JAMC-D-19-0042.1.

- 31. Bruick Z.S., Rasmussen K.L., Cecil D.J.. Subtropical South American hailstorm characteristics and environments. Mon. Wea. Rev. 2019, 147: 4289—4304. doi: 10.1175/MWR-D-19-0011.1.
- 32. *Marion G.R., Trapp R.J., Nesbitt S.W.* Using overshooting top area to discriminate potential for large, intense tornadoes. Geophys. Res. Lett. 2019, 46: 12520—12526. doi: 10.1029/2019GL084099.
- 33. 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].
- 34. 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 prirodnych sred». XXVII All-Russia Symposium "Radar Investigations of Natural Environments». St. Petersburg, 2011: 211—225. [In Russian].
- 35. 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 konferenzii po FO i AV na gidrometeorologicheskie prozessy. Proceedings of the All-Russian Open Conference on FO and AB on Hydrometeorological Processes. Nalchik, 2021: 192—198. [In Russian].
- 36. 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 konferenzii 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].
- 37. *Browning K.A., Ludlam F.H.* Radar analysis of a hailstorm. Tech. Note No. 5. Dept. of Meteorology. Imperial College. London, 1960: 106 p.
- 38. *Newton C. W., Fankhauser J.C.* Movement and propagation of multicellular convective storms. Pure Appl. Geophys. 1975, 113: 747—764. doi: 10.1007/BF01592957.
- 39. *Chisholm A.J.* Radar case studies and airflow models. Alberta Hailstorms. Meteor. Mon. 26. Amer. Met. Soc. 1973: 1—36. doi: 10.1007/978-1-935704-32-4.
- 40. *Marwitz J.D.* The structure and motion of severe hailstorms. Part II: Multi-cell storm. J. Appl. Meteor. 1972, 11: 180—188. doi: 10.1175/1520-0450(1972)011%3C0180:TSAMOS%3E2.0.CO.
- 41. Chalon J.-P., Fankhauser J.C., Eccles P.J. Structure of an evolving hailstorm. Part I: General characteristic and cellular structure. Man. Wea. Rev. 1976, 104: 564—575. doi: 10.1175/1520-0493 (1976)104<0564:SOAEHP>2.0.CO;2.
- 42. Fankhauser J.C. Hail Storms of the Central High Plains. Vol. 2. Part I: 22 June 1976 case study—a complex multicellular hail and rainstorm. Chap. 13: Large-scale influences, radar echo structure and mesoscale circulations. C. Knight. P. Squires. Eds. Colorado Assoc. University Press, 1982.
- 43. Browning K.A., Fankhauser J.C., Chalon J.P., Eccles P.J., Strauch R.G., Merrem F.H., Musil D.J., Mav E.L., Sand W.R. Structure of an Evolving Hailstorm, Part V; Synthesis and Implications for Hail Growth and Hail Suppression. Monthly Weather Rev. 1976, 104: 603—610. doi: 10.1175/1520-0493 (1976)104<0603:SOAEHP>2.0.CO;2.
- 44. *Starostin A.N.* Classification of cumulonimbus cloud evolution types. *Aktivnoe vozdejstvie na atmosfernye prozessy v Moldove.* Active impact on atmospheric processes in Moldova. 1992, 3: 58—74. [In Russian].
- 45. *Harrold T.W.* Notes on Thunderstorm Motions, Heights and Circulations. ESSA Technical Memorandum IERTM-NSSL-29. 1966: 1—8.
- 46. *Rotunno R*. On the evolution of thunderstorm rotation. Mon. Weather Rev. 1981, 109: 171—180. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
- 47. *Klemp J. B.* Dynamics of tornadic thunderstorms. Ann. Rev. Fluid Mech. 1987, 19: 369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.
- 48. Starostin A., Abdoullaev S., Nunes A.B. Evolução das tempestades em sistemas convectivos de mesoescala não lineares. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2000: 1990—1995.
- 49. *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.
- 50. *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 Met. Soc. of Jap. 1971, 49, 3: 191—213. doi: 10.2151/JMSJ1965.49.3 191.

51. Wang C., Tai-Jen Chen G., Yang S., Tsuboku K. Wintertime Supercell Thunderstorms in a Subtropical Environment: Numerical Simulation. J. Monthly Weather Review. 2009, 137, 7: 2175—2202. doi: 10.1175/2008MWR2616.1.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 10.10.2021 Принята к публикации после доработки 28.01.2022

Сведения об авторах

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

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