
ГЕОФИЗИКА

УДК 551.501.81+578.7

Радиолокационные исследования интенсивного градового процесса, развивавшегося над центральной частью Северного Кавказа 07.06.2012

Бареева М.В., Инохин В.С., Калов Х.М. – академик АМАН, Калов Р.Х. – член-корреспондент АМАН, Макитов В.С., Куцев С.А

Введение. Радиолокационные методы являются наиболее эффективным средством исследования микрофизических и динамических процессов, протекающих в грозоградовых облаках. С одной стороны, это связано с определенными ограничениями, а иногда и невозможностью использования прямых самолетных методов. С другой стороны, анализ полей радиолокационной отражаемости конвективной облачности позволяет исследовать опасные природные явления большого масштаба в реальном времени. В последние годы дополнительные преимущества такого подхода предоставляет использование автоматизированных компьютерных систем сбора, обработки и анализа радиолокационной информации [1-3, 10]. Реализованные в таких системах алгоритмы расчета параметров микроструктуры облаков и осадков, площади выпадения града, объема градового очага, потока кинетической энергии и суммарной кинетической энергии выпадающего града позволяют более детально исследовать основные закономерности зарождения и роста града, выявить особенности структуры и динамики развития градовых облаков. Учитывая, что формирование мощной конвективной облачности, грозовых и градовых процессов возможно лишь при определенных термодинамических и аэросиноптических условиях в атмосфере, важное значение имеет сопоставительный анализ данных температурно-ветрового зондирования атмосферы, синоптической и спутниковой информации как фоновых данных при проведении радиолокационных исследований. В связи с этим, целью данной работы является комплексный анализ результатов радиолокационных исследований интенсивного градового процесса, развивавшегося над центральной частью Северного Кавказа 07.06.2012 года.

Аэросиноптические и термодинамические условия формирования и развития градового процесса 07.06.2012.

Анализ синоптической ситуации и прогноз развития градового процесса 07.06.2012 г. проводился согласно принципам, изложенным в [4], когда развитие и интенсивность градового процесса определяется не только мезомасштабными термодинамическими и циркуляционными характеристиками рассматриваемого региона, но и факторами макромасштабной циркуляции в средней и верхней тропосфере, к которым следует отнести характер макромасштабной циркуляции, глубину и направленность макроложбины, интенсивность развитых в ней циклонов, с которыми связаны <градоопасные зоны> – области наиболее интенсивной адвекции холодного воздуха над регионом прогноза.

В последние годы преобладающим типом макромасштабной циркуляции в средней тропосфере является зональный тип W или тип Wc с нарушением зональности. Он характеризуется преобладанием неглубоких (до 1,5 тыс. км) широких макроложбин, быстро перемещающихся вдоль широтных кругов и отсутствием Арктического минимума (центра низкого давления) в приполярной области. Струйное течение при этом располагается значительно севернее района Кавказа.

В рассматриваемом случае, 5-7 июня 2012 г., характер макромасштабной циркуляции в средней тропосфере (АТ 500гПа) представлял собой зональный тип Wc с нарушением

ем зональности и был определен по характерной для данного месяца изогипсе 560гПа [17]. Арктический центр низкого давления [4, 5] находился в районе моря Лаптевых ($t_{ц} = -24^{\circ}\text{C}, n = 4$), но макроложбина, распространившаяся к югу и способствовавшая развитию градового процесса, возникла благодаря многоцентровой циклонической депрессии, сформировавшейся над Скандинавией ($t_{ц} = -24^{\circ}\text{C}, n = 3$). Такой характер макромасштабной циркуляции приводит, как правило, к развитию локальных грозоградовых процессов средней интенсивности.

Постепенное расширение макроложбины к 07.06.2012 и смещение ее к востоку обеспечивало заток холодного воздуха в регион и формирование благоприятных условий для развития глубокой конвекции. Область наиболее интенсивной адвекции холодного воздуха – «градоопасная зона» – сформировалась благодаря наличию частного циклона и связанного с ним очага холода над западом Черного моря с температурой в центре -17°C [5]. «Градоопасная зона» располагалась вдоль гор и имела значительную протяженность. Интенсивность адвекции в системе «градоопасной зоны» в средней тропосфере, согласно [6, 7], равнялась $F_1 = -0,471 \cdot 10^{-5}$ град \cdot м \cdot с $^{-1}$ /100км (05.06.2012), $F_2 = -0,272 \cdot 10^{-5}$ град \cdot м \cdot с $^{-1}$ /100км (06.06.2012), $F_3 = -0,426 \cdot 10^{-5}$ град \cdot м \cdot с $^{-1}$ /100км (07.06.2012), что также указывает на развитие градового процесса средней интенсивности.

У поверхности Земли процесс развивался в малоградиентном поле пониженного давления, обусловленном ложбиной с юга, в системе которой возникают частные циклоны: один над восточным побережьем Черного моря, перемещающийся затем к северу и занимающий обширную территорию, другой – над восточными районами Северного Кавказа. Циклонические образования существуют в течение всего дня и подпитываются углубляющимся циклоном с юга. Положение частных циклонов определило области локализации развивающихся конвективных процессов. Для подтверждения этой гипотезы нами было построено поле приземной температуры смоченного термометра на кольцевой карте региона за 03 ч грвч. 07.06.2012 г. и выявлены приземные линии потенциальной неустойчивости, локализирующие области предполагаемого развития градовых процессов [8]. По сути выделяемые области градиента температуры смоченного термометра $\Delta t_{см}/\Delta x$ являются областями наибольших энергетических контрастов между участками воздушной массы и приводят к локальному усилению конвективного (градового) процесса, увеличению его интенсивности. Пороговым значением градиента $\Delta t_{см}/\Delta x$ в выделенных областях, при котором наблюдается развитие градового процесса, является $\Delta t_{см}/\Delta x = 2^{\circ}\text{C}/100$ км. Чем выше значение градиента $\Delta t_{см}/\Delta x$, тем выше интенсивность развивающегося процесса. В рассматриваемом случае градиенты температуры смоченного термометра $\Delta t_{см}/\Delta x$ в выделенных областях достигали 4, 8, 2, 4, 8, 6 $^{\circ}\text{C}/100$ км.

Анализ термодинамического состояния воздушных масс в исследуемые дни проводился на основе данных температурно-ветрового зондирования тропосферы, выполненного на метеостанции Минеральные Воды. Термодинамические условия развития градового процесса 07.06.2012 являются наиболее благоприятными для процессов высокой интенсивности. Как видно из рисунка 1, значение полной энергии неустойчивости атмосферы 07.06.2012 достигло 2542 Дж/кг, что обычно характерно для интенсивных градовых процессов. Следует особо отметить наличие небольшого слоя инверсии температуры на уровне 700 гПа. Такой инверсионный слой приводит к определенному торможению в развитии конвекции на ранней стадии и играет роль своеобразного форсажа при дальнейшем прогреве подстилающей поверхности. После прорыва этого задерживающего слоя конвекция получает дополнительный динамический импульс, вследствие чего максимальные

скорости восходящих потоков в градовых облаках существенно превышают расчетные значения. Именно этим зачастую объясняется рост крупного града в облаках, где по расчетам прогнозировался град среднего размера. Прогноз типа градового процесса для данного дня по соотношению «полная энергия неустойчивости – сдвиг ветра» показывает, что наиболее вероятным в этот день выглядит развитие многоячейкового градового процесса. Причем точка, соответствующая данному процессу на врезке рисунка 1, находится практически на границе с областью процессов так называемого переходного типа. Отдельные ячейки таких процессов имеют стадию квазистационарности, характерную для суперячейковых градовых облаков. Как показали радиолокационные наблюдения, наиболее интенсивные градовые ячейки процесса 07.06.2012 действительно были достаточно долгоживущими и имели в своем развитии хорошо выраженную стадию квазистационарности. Приведенный на нижней врезке рисунка 1 график показывает, что градовый процесс 07.06.2012 относится к процессам средней или высокой интенсивности, вероятность процесса слабой интенсивности существенно ниже.

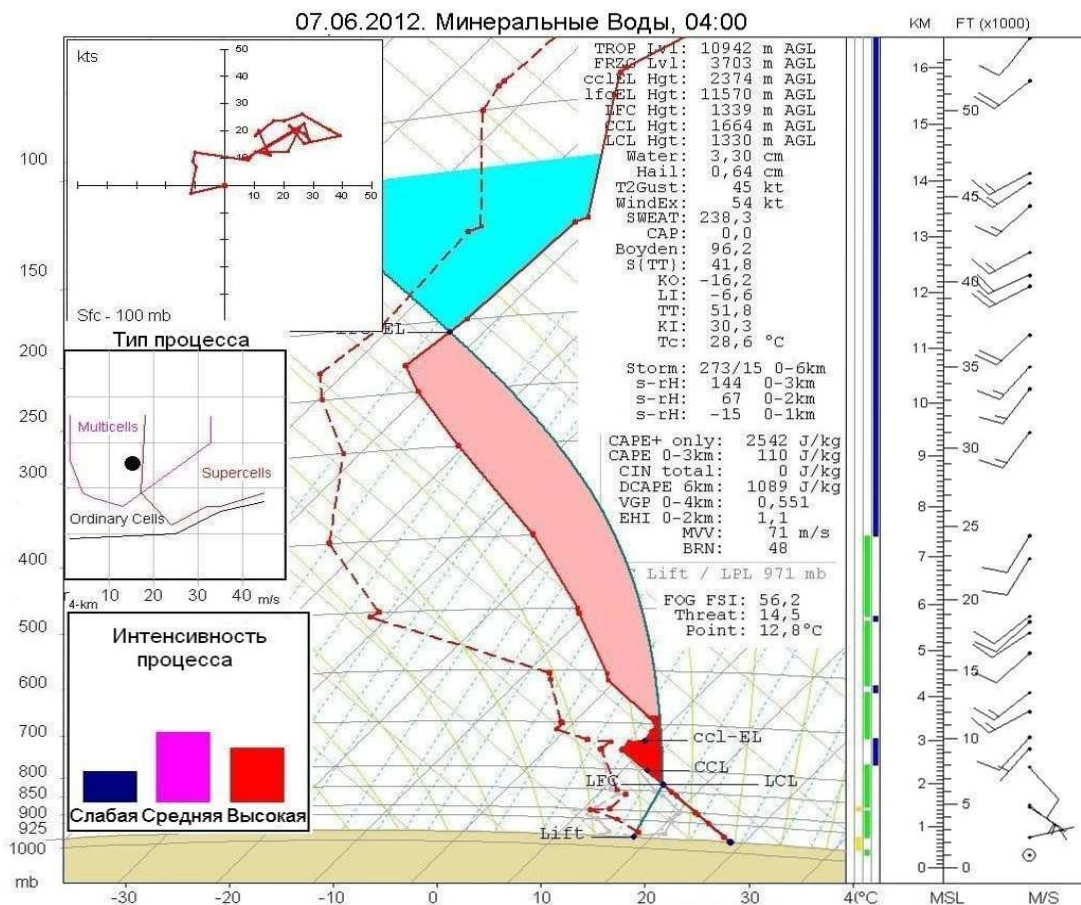


Рис. 1. Результаты температурно-ветрового зондирования тропосферы за 04:00 07.06.2012, выполненного на метеостанции Минеральные Воды. Максимальные значения приземной температуры и температуры точки росы скорректированы по данным автоматической метеостанции, расположенной в Нальчике.

Представленный выше анализ данных радиозондирования атмосферы базируется на основе так называемого метода частицы – одного из наиболее простых методов оперативного анализа конвекции. На рисунке 2 приводятся результаты расчета основных термодинамических параметров градового облака в рамках струйной модели конвекции, разработанной в [9]. Используется полуторамерная стационарная численная модель конвективно-

го облака, входными параметрами для которой служат данные температурно-ветрового радиозондирования атмосферы. Расчет проводился с использованием результатов радиозондирования в пункте Минеральные Воды с коррекцией максимальных приземных значений температуры и влажности воздуха по данным автоматической метеостанции, установленной в Нальчике.

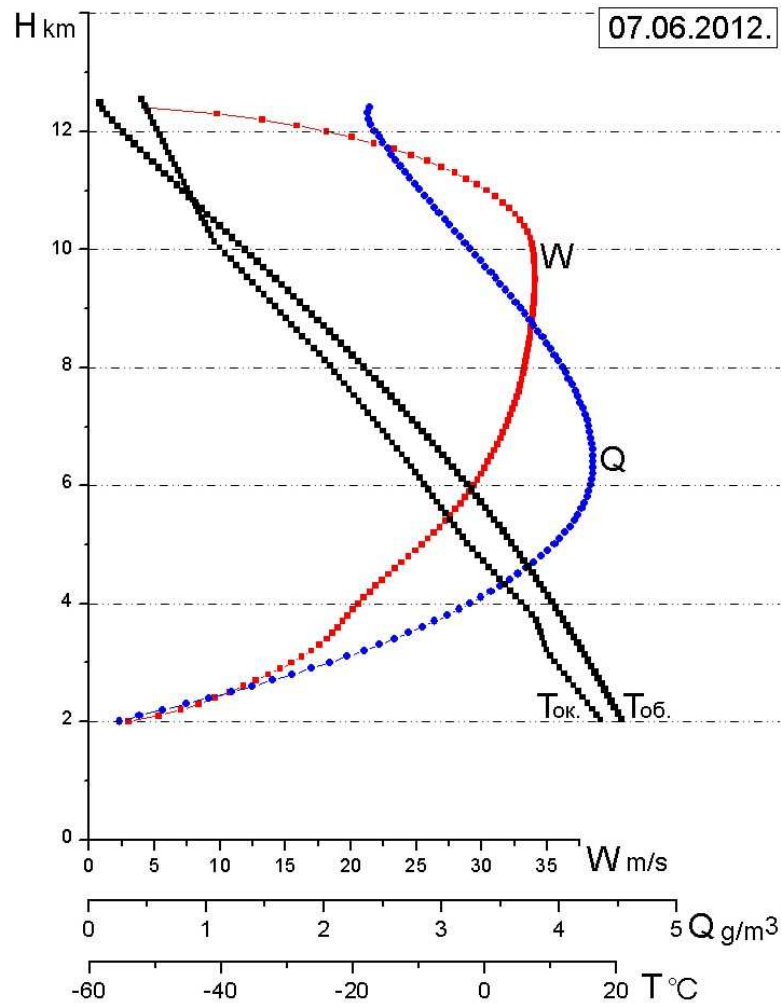


Рис. 2. Результаты расчета основных термодинамических параметров градового облака 07.06.2012 в рамках струйной модели облачной конвекции. Приводятся высотные распределения скорости вертикальных потоков W , влажности Q и температуры в облаке $T_{об}$ и окружающей атмосфере $T_{ок}$.

Приведенные на рисунке 2 кривые в значительной степени соответствуют распределению полной энергии неустойчивости атмосферы, показанному на рисунке 1. Максимальный перегрев в модельном облаке составил $6,45^{\circ}\text{C}$ на высоте $5,2$ км. Максимальная скорость восходящих потоков в облаке достигала $34,1$ м/с на высоте $9,5$ км при температуре в облаке $-30,2^{\circ}\text{C}$. Очевидно, что такое расположение уровня максимальной вертикальной скорости в облаке способствует росту крупного града. Кроме того, наличие характерного плато в распределении скорости восходящего потока на высотах от $6,5$ до 10 км, расположенного непосредственно над максимумом жидкокапельной влажности ($6,5$ км), свидетельствует об оптимальных условиях для роста крупного града в этот день.

Радиолокационная структура и динамика развития отдельных ячеек градового процесса 07.06.2012.

Непрерывные многочасовые радиолокационные исследования градового процесса 07.06.2012 проводились с использованием двухволнового ($\lambda_1 = 3,2$ см, $\lambda_2 = 10$ см) метеорологического радара МРЛ-5, оснащенного автоматизированной компьютерной системой сбора, обработки и анализа радиолокационной информации [1, 3].

Градовый процесс 07.06.2012 характеризовался наличием большого числа конвективных ячеек, последовательным формированием отдельных крупномасштабных комплексов ячеек на большой территории, охватывающей практически всю центральную часть Северного Кавказа. Такие процессы обычно относят к так называемым процессам переходного типа, когда отдельные, наиболее интенсивные градовые ячейки имеют стадию квазистационарности, характерную для суперячейковых градовых облаков.

Первое радиоэхо градового процесса 07.06.2012 было зарегистрировано в 12:12 в верховьях р. Малка. Для градовых процессов центральной части Северного Кавказа такое расположение первого радиоэха является наиболее повторяющимся вне зависимости от типа процесса и направления перемещения отдельных градовых ячеек. Более детально эти вопросы рассмотрены в работах [10-12]. В 12:25 было зарегистрировано первое радиоэхо комплекса конвективных ячеек, развивавшихся в средней части Баксанского ущелья. К 12:46 этот комплекс представлял собой полосу конвективных ячеек, ориентированную с севера на юг. Интенсивно развиваясь и сменяя друг друга, ячейки этого комплекса достигли грозовой стадии. В отдельных ячейках индицировались крупа и мелкий град. К 13:45 одна из ячеек комплекса становится доминантной (в дальнейшем ячейка 1). В это же время в горах, в междуречье Кубани и Малки, формируется новый комплекс грозовых ячеек. Общая картина развития конвективной облачности, зарегистрированная радаром в 13:45, показана на рисунке 3. Там же приводится серия последовательных вертикальных разрезов ячейки 1. На рисунке 3 так же, как и на всех последующих рисунках, поля радиолокационной отражаемости приводятся без области 0-15 dBZ. При анализе многоячейковых процессов большого масштаба это позволяет более наглядно отобразить ячейковую структуру облачных массивов и сократить размеры самих рисунков.

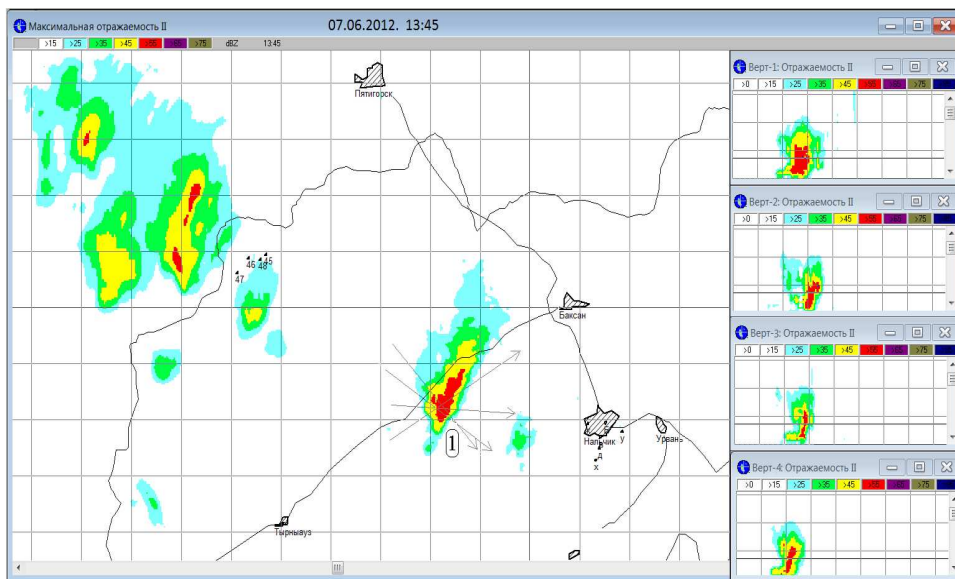


Рис. 3. Общая картина развития конвективной облачности, зарегистрированная радаром в 13:45. Справа приводится серия вертикальных разрезов ячейки 1 (направления разрезов показаны стрелками).

К 14:47 ячейка 1 достигла градовой стадии. В 14:55 в ней индицируется град размером 1,5-2,0 см. К 15:22 ячейка 1 практически полностью диссипировала. К этому времени

процесс развития новых ячеек постепенно приобретает упорядоченный характер. Активируется юго-восточная периферия облачного массива. Так в 15:40 юго-западнее Нальчика было зарегистрировано первое радиоэхо новой конвективной ячейки (в дальнейшем ячейка 2). Смещаясь на северо-восток и интенсивно развиваясь, к 16:11 эта ячейка достигла градовой стадии. В 16:40 в ячейке 2 индицировался крупный град с $d_{max} = 4-5$ см. По наземным данным в это время отмечалось выпадение града в западных пригородах Нальчика. В 15:54 юго-восточнее Нальчика регистрируется первое радиоэхо новой конвективной ячейки (в дальнейшем ячейка 3). Эта ячейка так же, как и все предыдущие, смещалась на северо-восток. В 16:54 ячейка 3 достигла градовой стадии. В 16:28 юго-западнее Нальчика регистрируется первое радиоэхо новой конвективной ячейки (в дальнейшем ячейка 4), которая полностью повторяет эволюцию ячейки 2, двигаясь практически по той же самой траектории. К 16:44 исследуемый облачный массив представлял собой две параллельные полосы конвективных ячеек, ориентированных с северо-запада на юго-восток. При этом наиболее интенсивные ячейки составляли восточную полосу, а развивающиеся - западную. Кроме того, с 16:37 начинается формирование нового комплекса конвективных ячеек северо-восточнее г. Прохладный, за пределами Кабардино-Балкарии. Находясь на расстоянии около 60 км от рассматриваемых ячеек, этот комплекс в течение нескольких часов развивается, не взаимодействуя с ними. На рисунке 4 приводится общая картина развития конвективной облачности, зарегистрированная радаром в 16:44. Справа на врезке рисунка показаны вертикальные разрезы ячейки 2.

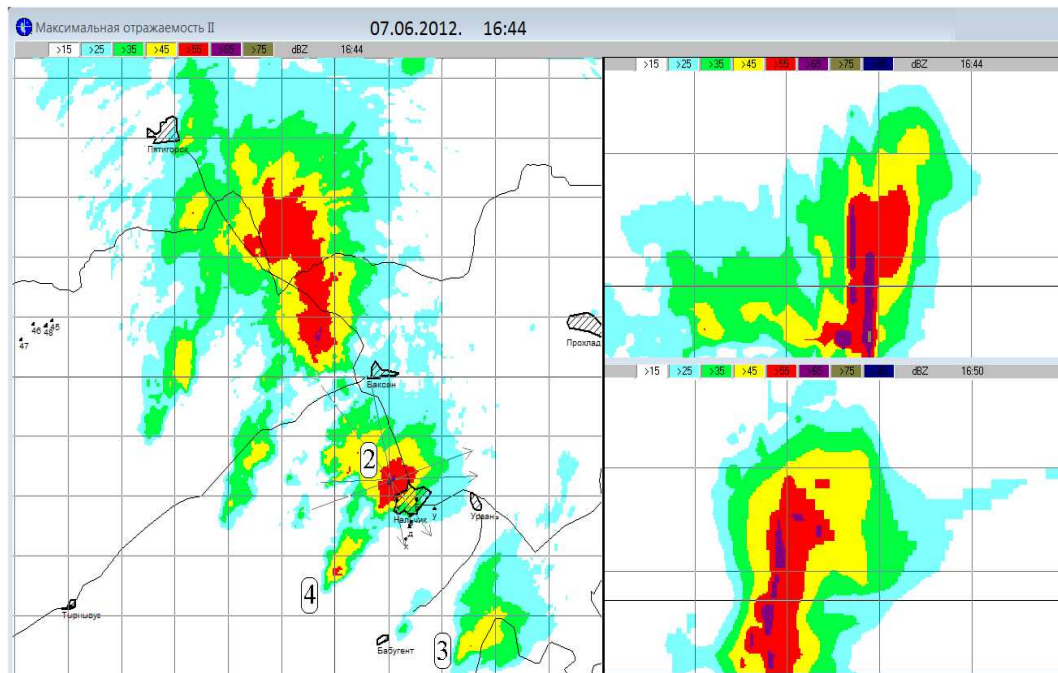


Рис. 4. Общая картина развития конвективной облачности, зарегистрированная радаром в 16:44. Справа приводятся вертикальные разрезы ячейки 2 в плоскости максимальных значений радиолокационной отражаемости.

К 16:54 ячейка 4 достигла градовой стадии. Как было отмечено выше, траектория этой ячейки полностью повторяет траекторию ячейки 2. По интенсивности ячейка 4 незначительно уступает своей предшественнице, тем не менее, после ее прохождения также отмечалась устойчивая полоса выпадения града в районе западных и северо-западных пригородов Нальчика. Примерно в то же время достигла градовой стадии и ячейка 3, развивавшаяся в районе границы между Кабардино-Балкарией и Северной Осетией. В 17:09

юго-восточнее ячейки 3 регистрируется первое радиоэхо новой конвективной ячейки (в дальнейшем ячейка 5). В 16:50 градовой стадии достигают северные ячейки комплекса, расположенного северо-восточнее г. Прохладный. К 17:09 град индицируется уже во всех ячейках этого комплекса. Именно с этого времени развитие ячеек основной полосы, ориентированной с северо-запада на юго-восток, начинает замедляться и к 17:38 прекращается вообще. Исключение составляет только ячейка 5, расположенная на южной периферии этой полосы. Эта ячейка находится на ранней стадии своего развития, но уже к 17:20 в ней индицируется град.

Примерно в это же время интенсивно развиваются ячейки нового комплекса, расположенного северо-восточнее г. Прохладный, на территории Ставропольского края. Они значительно превосходят по площади все ранее развивавшиеся ячейки. Град в них индицируется примерно с 16:50. В 17:36 южная ячейка этого комплекса (в дальнейшем ячейка 6) становится доминирующей, ее радиолокационная структура приобретает вид типичного суперячейкового градowego облака. На рисунке 5 приводится общая картина развития конвективной облачности, зарегистрированная радаром в 17:36. К этому времени своего максимального развития достигают ячейки 5 и 6. Активность остальных ячеек несколько снижается. Справа на рисунке 5 приводится серия вертикальных разрезов ячеек 5 (снизу) и 6 (сверху).

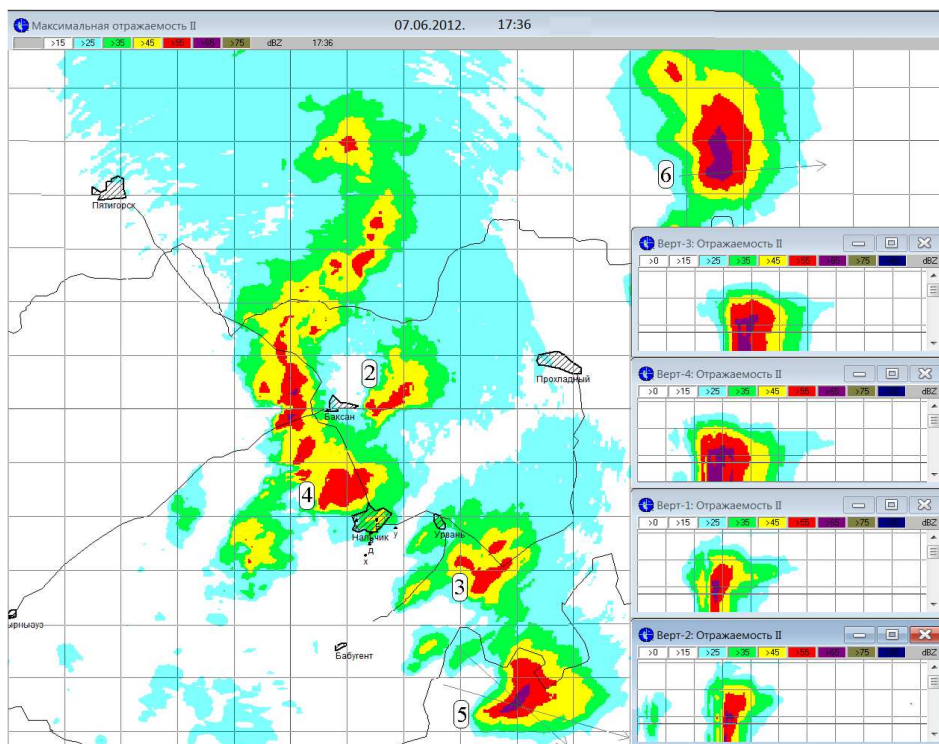


Рис. 5. Общая картина развития конвективной облачности, зарегистрированная радаром в 17:36. Справа приводится серия вертикальных разрезов ячеек 5 (снизу) и 6 (сверху).

К 18:00 развитие ячеек северной части исследуемого облачного массива практически прекращается. Выпадение града продолжается только из самой южной ячейки комплекса (ячейки 5), движущейся с юго-запада на северо-восток в районе границы между Кабардино-Балкарией и Северной Осетией. К 18:15 эта ячейка несколько ослабевает, продолжая, тем не менее, находиться в градовой стадии. К этому времени активность южной части комплекса выражается в формировании и развитии новых конвективных ячеек южнее и юго-восточнее ячейки 5. Примерно те же процессы происходят и в ком-

плексе, расположенном северо-восточнее г. Прохладный. Ячейка 6 ослабевает и теряет свое доминирующее положение. Радиолокационная структура комплекса приобретает вид неупорядоченного многоячейкового процесса. В большинстве ячеек индицируются интенсивный ливень и крупа.

На рисунке 6 приводится общая картина конвективной облачности, зарегистрированная радаром в 19:51. К этому времени в облачном массиве отмечаются только две активные ячейки. Ячейка 8 находится на стадии диссипации. Все радиолокационные параметры ячейки падают, зона повышенной отражаемости распадается на несколько локальных максимумов, отмечается выпадение дождей на большой площади. Ячейка 9 достигает стадии максимального развития. В облаке индицируется град с максимальным размером $d_{\max} = 1,5 - 2,0$ см. При этом общая интенсивность процесса падает. Резко замедляется, а затем и полностью прекращается процесс формирования новых ячеек. Фактически ячейки 8 и 9 являются последними градовыми ячейками, развивавшимися в этот день. Учитывая то, что первые градовые ячейки были зарегистрированы северо-западнее Нальчика, в междуречье Кубани и Малки, а последние юго-восточнее, на территории Северной Осетии-Алании, можно сделать вывод о том, что процесс градообразования в этот день распространялся с северо-запада на юго-восток, хотя отдельные градовые ячейки перемещались в основном с юго-запада на северо-восток.

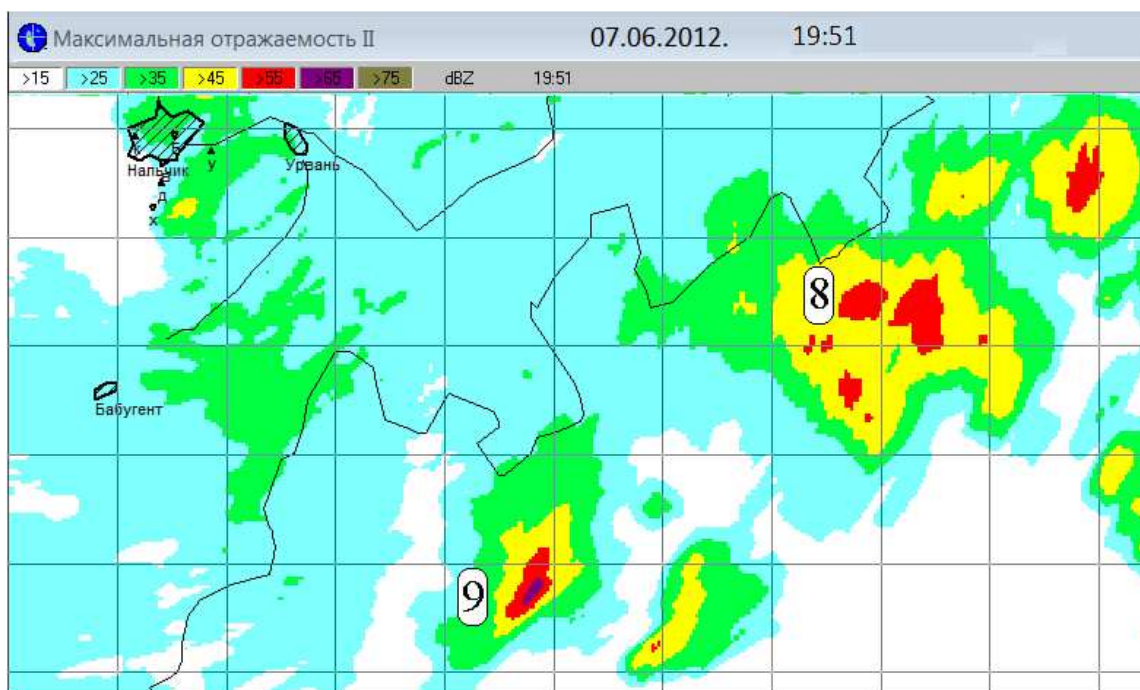


Рис. 6. Общая картина развития конвективной облачности, зарегистрированная радаром в 19:51.

Таким образом, градовый процесс 07.06.2012 года характеризовался большим количеством конвективных ячеек, зарождение, формирование и развитие которых проходило без строгой организации и упорядоченности. Несмотря на это, градовый процесс 07.06.2012 года скорее относится к процессам переходного типа, чем к неупорядоченным многоячейковым процессам, поскольку наиболее интенсивные градовые ячейки имели стадию квазистационарности, характерную для суперячейковых облаков. Формирование и развитие отдельных градовых ячеек проходило в нескольких крупномасштабных кластерах, расположенных на территории Кабардино-Балкарии, Ставропольского края и Северной Осетии. Процесс градообразования в этот день распространялся с северо-запада

на юго-восток, хотя отдельные градовые ячейки, сменяя друг друга, перемещались в основном с юго-запада на северо-восток. Общая продолжительность радиолокационных наблюдений в этот день составила около 12 часов – с 12:07 до 23:59.

Радиолокационные измерения параметров микроструктуры градовых облаков

Определение микрофизических параметров градовых облаков проводилось двухволновым радиолокационным методом, реализованным на автоматизированном комплексе MeteoX [1]. При этом расчет величин радиолокационной отражаемости града для двух длин волн выполнялся исходя из известного соотношения для радиолокационной отражаемости:

$$\eta_{\lambda_{1,2}} = 10^{-6} \int_{r_{\min}}^{k_{\max}} \sigma_{\text{гр}}(h, r, \lambda) n_{\text{гр}}(r) dr, \quad (1)$$

где $\eta_{\lambda_{1,2}}$ – радиолокационная отражаемость для $\lambda_1 = 3,2$ см, $\lambda_2 = 10$ см; $\sigma_{\text{гр}}(h, r, \lambda)$ – поперечное сечение обратного рассеяния града, зависящее от r – радиуса градины, λ – длины волны и h – толщины пленки воды на поверхности града; $n_{\text{гр}}(r)$ – функция распределения градин по размерам.

В качестве функции распределения градин по размерам используется гамма-распределение:

$$n(r) = N \frac{b^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1)} \frac{r^{\mu}}{\bar{r}^{\mu+1}} e^{-b \frac{r}{\bar{r}}}, \quad (2)$$

где $b = \sqrt[3]{(\mu+1)(\mu+2)(\mu+3)}$; μ – параметр формы кривой распределения; \bar{r}_3 – среднекубический радиус градин.

Из соотношений (1) и (2) видно, что отражаемость зависит от многих характеристик, однако результаты расчетов и их сопоставления с экспериментальными данными показали, что радиолокационная отражаемость града в основном определяется его размером (d_3) и концентрацией (N). Для случая двух длин волн имеет место система уравнений, связывающих радиолокационную отражаемость со среднекубическим диаметром и концентрацией града в облаке (при параметризации остальных характеристик):

$$\eta_{3,2} = A_1 N d_3^{\alpha_1}, \quad (3)$$

$$\eta_{10} = A_2 N d_3^{\alpha_2}.$$

Известно, что существенное влияние на величину отражаемости оказывает также и толщина поверхностной пленки воды на градинах. Причем коэффициенты в расчетных соотношениях (3) для растущего и тающего града будут различаться. Другими словами, для каждого термодинамического режима роста и таяния града будет иметь место свой набор величин A_1 , A_2 и α_1, α_2 .

Расчет основных микрофизических характеристик выполнен на примере градовой ячейки 2, траектория перемещения которой проходила западнее Нальчика. Именно с этой ячейкой было связано выпадение наиболее крупного града. На рисунке 7 приведена траектория перемещения градовой ячейки 2, представленная в виде последовательных горизонтальных сечений от момента регистрации первого радиоэха до полной диссипации ячейки. Как видно из рисунка 7, первое радиоэхо ячейки 2 было зарегистрировано в 15:40 юго-западнее Нальчика. Интенсивно развиваясь, облако перемещается на северо-восток со скоростью около 25 км/час. Максимальные радиолокационные параметры ячейки 2

были отмечены с 16:40 по 17:20, когда из облака выпадал град размером 3,5-5,0 см. В это время градовое облако проходило над западными пригородами Нальчика. Перемещаясь далее на северо-восток, ячейка 2 на стадии максимального развития проходит между городами Баксан и Нарткала и начинает ослабевать, находясь уже западнее города Прохладного.

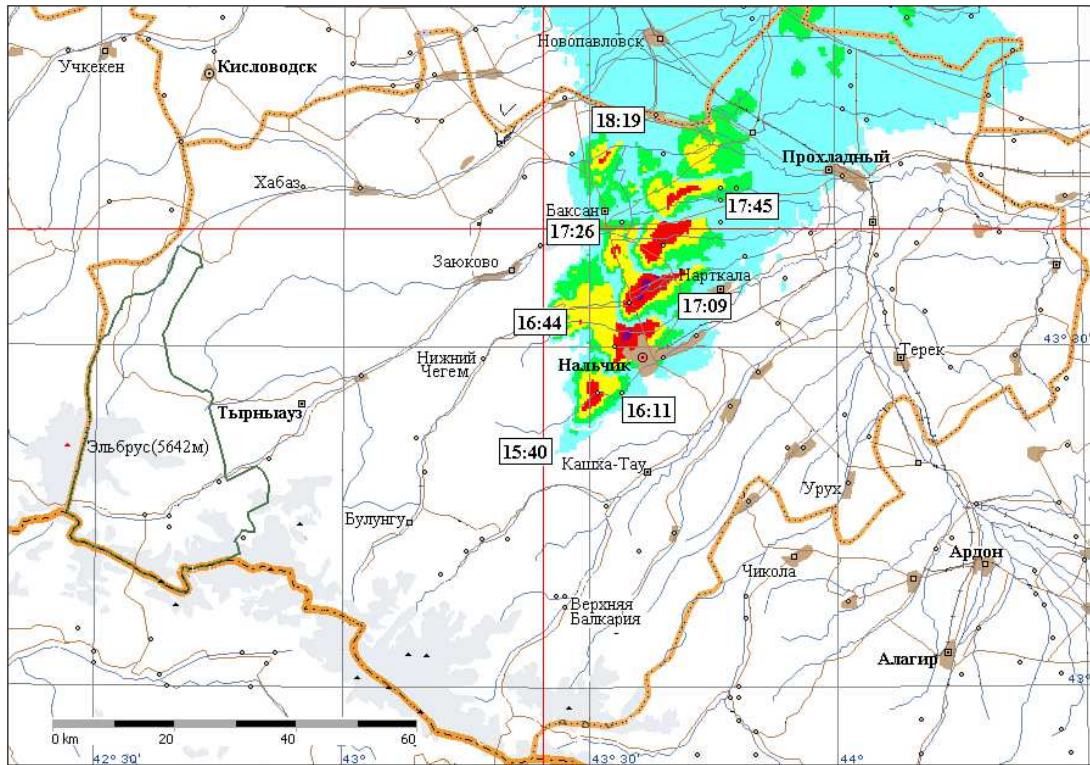


Рис. 7. Перемещение радиозага градовой ячейки 2. Приведены последовательные горизонтальные сечения ячейки от момента регистрации первого радиозага до начала стадии диссипации.

На рисунке 8 приводится временной ход основных радиолокационных параметров градовой ячейки 2. Там же показаны результаты расчета максимального размера града d_{max} двухволновым методом. Окружности радиусом, соответствующим максимальному размеру града, указаны на кривой высоты максимальной отражаемости H_{max} . Именно для этих точек автоматизированный комплекс рассчитывает значения максимального размера града. Как видно из рисунка 8, град максимального размера $d_{max} = 5,5$ см регистрировался в облаке в 16:44. Крупный град $d_{max} = 3,6$ см выпадал из облака до 17:20. В 17:45 регистрировался град размером $d_{max} = 2,1$ см, а в 18:15 размер града не превышал $d_{max} = 1,5$ см. Площадь градового очага резко возросла с $1,6$ км² в 16:32 до $24,6$ км² в 16:50. Следует отметить, что все кривые, приведенные на рисунке 8, имеют плато, характерное для стадии квазистационарности, когда параметры градового облака практически сохраняют свои значения или слабо варьируются относительно некой константы. Продолжительность стадии квазистационарности для ячейки 2 составила приблизительно 40-50 минут. Для суперячейковых облаков Северного Кавказа продолжительность стадии квазистационарности обычно составляет 2-3 часа, доходя иногда до 4-5 часов.

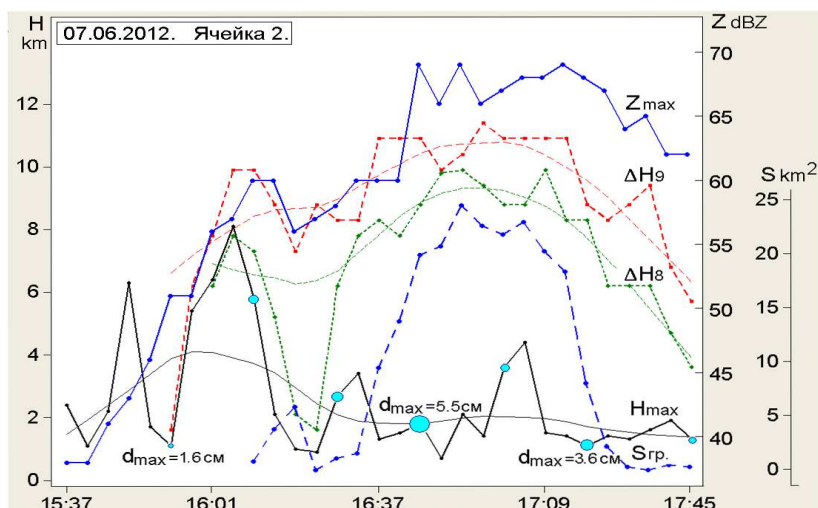


Рис. 8. Временной ход основных радиолокационных параметров ячейки 2 градового процесса 07.06.2012 г. На кривой высоты максимальной отражаемости H_{max} приведены значения максимального размера града d_{max} , рассчитанные автоматизированным комплексом.

Основные микрофизические характеристики града в облаке, рассчитанные двухволновым радиолокационным методом, с учетом ряда дополнений, описанных в [1, 3, 13, 14], представлены в таблице 1. Как видно из таблицы, максимальные параметры облака по времени соответствуют стадии квазистационарности. В это время ячейка находилась западнее Нальчика. Именно там выпал град максимального размера, и был отмечен максимальный ущерб.

Таблица 1 – Микрофизические характеристики града в облаке (градовом очаге) для ячейки 2

| Время | Максимальный размер града, см | Концентрация, m^{-3} | Поток кинетической энергии, Дж/ (m^2c) | Ледность, г/ m^3 | Коэф. ослабления | Объем градового очага, km^3 |
|------------------|-------------------------------|------------------------|--|--------------------|------------------|-------------------------------|
| 15 ⁵⁴ | 1,6 | 0,3 | 0,1 | 0,05 | 0,1 | 6 |
| 16 ⁰⁸ | 2,7 | 0,2 | 0,8 | 0,18 | 0,2 | 70 |
| 16 ²⁶ | 3,0 | 0,1 | 0,8 | 0,15 | 0,2 | 359 |
| 16 ⁴⁴ | 5,5 | 0,1 | 5,3 | 0,41 | 0,3 | 884 |
| 17 ⁰⁰ | 2,5 | 1,6 | 4,2 | 1,03 | 1,2 | 703 |
| 17 ²⁰ | 3,6 | 0,4 | 4,8 | 0,70 | 0,7 | 421 |
| 17 ⁴⁵ | 2,1 | 1,2 | 1,4 | 0,44 | 0,5 | 224 |
| 18 ¹⁵ | 1,8 | 0,5 | 0,3 | 0,12 | 0,2 | 66 |
| 18 ²⁶ | 1,5 | 0,8 | 0,2 | 0,10 | 0,1 | 8 |

На рисунке 9 показаны градины, выпавшие приблизительно с 16:40 по 17:00. В выборку попали только градины максимального размера. Как видно из рисунка, размер градин соответствует результатам расчета для времени 16:44. Положение радиоэха ячейки в это время (рисунок 7) также соответствует месту выпадения собранных градин.



Рис. 9. Градины максимального размера, выпавшие юго-западнее Нальчика с 16:40 по 17:00.

Таким образом, сопоставительный анализ радиолокационной структуры и динамики развития градовой ячейки 2, а также результатов расчета микрофизических параметров показывает их хорошее соответствие. Временной ход основных радиолокационных параметров ячейки свидетельствует о наличии стадии квазистационарности продолжительностью около 40 минут. Направление перемещения ячейки 2 (с юго-запада на северо-восток) совпадает с наиболее часто встречающимся направлением перемещения градовых облаков для центральной части Северного Кавказа.

Заключение. Основными синоптическими факторами, способствующими формированию и развитию градового процесса 07.06.2012, являлись наличие Арктического центра низкого давления и макроложбины, распространявшейся к югу. Постепенное расширение макроложбины к 07.06.2012 и смещение ее к востоку обеспечивало заток холодного воздуха в регион и формированию благоприятных условий для развития глубокой конвекции. Область наиболее интенсивной адвекции холодного воздуха – «градоопасная зона» – сформировалась благодаря наличию частного циклона и связанного с ним очага холода над западом Черного моря с температурой в центре -17°C . «Градоопасная зона» располагалась вдоль гор и имела значительную протяженность. Интенсивность адвекции в системе «градоопасной зоны» в средней тропосфере, согласно, равнялась $F_1 = -0,471 \cdot 10^{-5}$ град \cdot м \cdot с $^{-1}$ /100 км (05.06.2012), $F_2 = -0,272 \cdot 10^{-5}$ град \cdot м \cdot с $^{-1}$ /100 км (06.06.2012), $F_3 = -0,426 \cdot 10^{-5}$ град \cdot м \cdot с $^{-1}$ /100 км (07.06.2012).

У поверхности Земли процесс развивался в малоградиентном поле пониженного давления, обусловленном ложбиной с юга, в системе которой возникают частные циклоны: один над восточным побережьем Черного моря, перемещающийся затем к северу и занимающий обширную территорию, другой – над восточными районами Северного Кавказа. Циклонические образования существовали в течение всего дня и подпитывались углубляющимся циклоном с юга. Положение частных циклонов определило области локализации развивающихся конвективных процессов. Выявлены приземные линии потенциальной неустойчивости, локализующие области предполагаемого развития градовых облаков. Градиенты температуры смоченного термометра $\Delta t_{\text{см}}/\Delta x$ в выделенных областях достигали $4,8^{\circ}\text{C}/100$ км, $2,4^{\circ}\text{C}/100$ км и $8,6^{\circ}\text{C}/100$ км при пороговом значении для градовых облаков $2,0^{\circ}\text{C}/100$ км.

Термодинамические условия развития градового процесса 07.06.2012 г. являются наиболее благоприятными для процессов высокой интенсивности. Значение полной энергии неустойчивости атмосферы достигало 2542 Дж/кг, что обычно характерно для интенсивных градовых процессов. По результатам расчета основных термодинамических па-

раметров градового облака в рамках струйной модели конвекции максимальный перегрев в облаке составил 6,45°С на высоте 5,2 км. Максимальная скорость восходящих потоков достигала 34,1 м/с на высоте 9,5 км при температуре в облаке -30,2°С. Такое расположение уровня максимальной вертикальной скорости в облаке способствует росту крупного града. Кроме того, наличие характерного плато в распределении скорости восходящего потока на высотах от 6,5 до 10 км, расположенного непосредственно над максимумом жидкокапельной водности (6,5 км), свидетельствует об оптимальных условиях для роста града в этот день.

Результаты многочасовых непрерывных радиолокационных исследований показали, что градовый процесс 07.06.2012 года характеризовался большим количеством конвективных ячеек, зарождение, формирование и развитие которых проходило без строгой организации и упорядоченности. Несмотря на это, градовый процесс 07.06.2012 года скорее относится к процессам переходного типа, чем к неупорядоченным многоячейковым процессам, поскольку наиболее интенсивные градовые ячейки имели стадию квазистационарности, характерную для суперячейковых облаков. Формирование и развитие отдельных градовых ячеек проходило в нескольких крупномасштабных кластерах, расположенных на территории Кабардино-Балкарии, Ставропольского края и Северной Осетии-Алании. Процесс градообразования в этот день распространялся с северо-запада на юго-восток, хотя отдельные градовые ячейки, сменяя друг друга, перемещались в основном с юго-запада на северо-восток. Общая продолжительность радиолокационных наблюдений составила около 12 часов – с 12:07 до 23:59.

Сопоставительный анализ радиолокационной структуры и динамики развития наиболее интенсивной градовой ячейки 2, а также результатов расчета микрофизических параметров показывает их хорошее соответствие. Максимальный размер выпадавшего града по радиолокационным данным менялся от 1.5 до 5.5 см в течение всей эволюции облака. По наземным данным размер градин, выпавших приблизительно с 16:40 по 17:00 соответствует результатам расчета для времени 16:44. Положение радиоэха ячейки в это время также соответствует месту выпадения собранных градин. Временной ход основных радиолокационных параметров ячейки свидетельствует о наличии стадии квазистационарности продолжительностью около 40 минут, характерной для суперячейковых градовых облаков. Направление перемещения ячейки 2 (с юго-запада на северо-восток) совпадает с наиболее часто встречающимся направлением перемещения градовых облаков для центральной части Северного Кавказа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инюхин В.С., Суслов В.В. Алгоритмы автоматизированного распознавания и анализа радиоэха облаков // Труды ВГИ. 2010. Вып. 96. С. 89-100.
2. Dixon, Michael, and Gerry Wiener TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting - A Radar-based Methodology // J. Atmos. and Oceanic Technol. 1993. Vol. 10, № 6. P. 785-797.
3. Абшаев М.Т., Атабиев М.Д., Инюхин В.С., Капитанников А.В., Тапасханов В.О. Алгоритмы автоматизированного радиолокационного измерения полей микрофизических характеристик градовых осадков // Труды ВГИ. 1990. Вып. 77. С. 86-106.
4. Гораль Г.Г., Бареева М.В. Кинематика высотных циклонов и интенсивность градовых процессов в регионе Кавказа // Труды ВГИ. 1989. Вып. 74. С. 124-132.
5. Бареева М.В. Влияние факторов макро- и мезомасштабной циркуляции на интенсивность градовых процессов в регионе Кавказа // Тр. ГМЦ. 1990. Вып. 308. С. 101-108.

6. Барекова М.В. Результаты статистического анализа взаимосвязи параметров высотных градоопасных зон с интенсивностью градовых процессов // Тр. VIII научно-техн. конф. мол. ученых ВГИ. Нальчик, 1989. деп. в ВИНТИ 29.09.89, №6064-B89.
7. Барекова М.В., Газаева З.А., Макитов В.С. Характерные траектории суперячейковых градовых процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ. 1999. Вып. 90. С. 80–95.
8. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. М.: Гидрометеиздат, 1995. 424 с.
9. Жекамухов М.К., Жакамитов Х.М. Некоторые результаты численного моделирования процессов градообразования в облаках при естественном их развитии и искусственном воздействии // Труды ВГИ. 1983. Вып. 48. С. 13–29.
10. Калов Х.М., Калов Р.Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозо-градовые облака и туманы. Нальчик: ООО «Полиграфсервис и Т». 2010. 220 с.
11. Газаева З.А., Макитов В.С. Распределение траекторий перемещения многоячейковых градовых процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ. 1991. Вып. 80. С. 93–99.
12. Makitov V.S. Analysis of hailstorm trajectories in North Caucasus (Russia) and Mendoza province (Argentina) // European Conference on Severe Storms. 9-12 November 2004. Leon, Spain.
13. Makitov V.S. Radar measurements of integral parameters of hailstorms used on hail suppression projects // Atmospheric Research. 2007. Vol. 83. P. 380–388.
14. Foote B.G., Krauss T.W., Makitov V.S. Hail metrics using conventional radar // 85th Annual Meeting of American Meteorological Society. 9-13 Jan. 2005. San Diego, CA USA.

ABSTRACT

The results of radar studies of the intensive hail process, which developed over the Central part of the North Caucasus on 07.06.2012, are presented. The analysis includes data on synoptic and thermodynamic conditions of convective cloud formation in the area of radar observations. The problems of radar structure and dynamics of development of separate hail cells and large-scale convective clusters are considered in detail. For the most intense hail cells, the parameters of the microstructure were calculated using the two-wave radar method. The results of the comparison of the maximum hail size by ground and radar data show their good compliance. Analyzed the time course of basic radar parameters hail cloud, the reconstructed trajectories move radioecho individual hail cells.

Keywords: radar studies, hail process, aersynoptic and thermodynamic conditions, hail microstructure, hail cell development dynamics

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik

© M.V. Varekova,
V.S. Inukhin,
Kh.M. Kalov,
R.Kh. Kalov,
V.S. Makitov,
A.S. Kushev, 2019

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты радиолокационных исследований интенсивного градового процесса, развивавшегося над центральной частью Северного Кавказа 07.06.2012 года. Анализ включает данные о синоптических и термодинамических условиях формирования конвективной облачности в районе проведения радиолокационных наблюдений. Подробно рассматриваются вопросы радиолокационной структуры и динамики развития отдельных градовых ячеек и крупномасштабных конвективных кластеров. Для наиболее интенсивных градовых ячеек выполнен расчет параметров микроструктуры с использованием двухволнового радиолокационного метода. Результаты сравнения максимального размера града по наземным и радиолокационным

данным показывают их хорошее соответствие. Анализируется временной ход основных радиолокационных параметров градовых облаков, восстановлены траектории перемещения радиоэха отдельных градовых ячеек.

Ключевые слова: радиолокационные исследования, градовый процесс, аэросиноптические и термодинамические условия, микроструктура града, динамика развития градовых ячеек

ФГБУ Высокотгорный геофизический институт, Нальчик

© М.В. Барекова,
В.С. Инюхин,
Х.М. Калов,
Р.Х. Калов,
В.С. Макитов,
С.А. Куцев, 2019