

УДК 551.515.4:551.501.81

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДОВОГО ОБЛАКА ПРИ СЛИЯНИИ КОНВЕКТИВНЫХ ЯЧЕЕК

© 2022 г. В. С. Макитов^а, *, В. С. Инюхин^а, С. А. Кушев^а, К. Б. Лиев^а

^аФГБУ “Высокогорный геофизический институт”, пр. Ленина 2, Нальчик, 360030 Россия

*e-mail: Stasuk6@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

После доработки 23.03.2022 г.

Принята к публикации 11.04.2022 г.

Представлены результаты многочасовых непрерывных радиолокационных наблюдений многоячейковой облачной системы, развивавшейся над центральной частью Северного Кавказа 07.06.2014 г. Подробно рассмотрены вопросы взаимодействия отдельных конвективных ячеек, составляющих единый комплекс радиоэха. Основное внимание уделено формированию градового облака при слиянии отдельных ячеек комплекса. Анализируется изменение основных радиолокационных параметров и микрофизических характеристик града в облаке в процессе слияния ячеек. Показано, что в результате слияния конвективных ячеек отмечается интенсификация микрофизических и динамических процессов, что в значительной степени способствует росту крупного града и увеличению продолжительности градовой стадии.

Ключевые слова: град, градовые ячейки, многоячейковые градовые процессы, первое радиоэхо, двухволновой метод индикации града

DOI: 10.31857/S0002351522040095

ВВЕДЕНИЕ

Развитие научных и прикладных программ по воздействию на конвективные облака с целью увеличения осадков или сокращения ущерба от града требует более детального и всестороннего исследования взаимодействия отдельных ячеек в процессе формирования и развития мезомасштабных облачных систем. Одним из наиболее перспективных подходов к решению таких задач является комплексный анализ результатов радиолокационных наблюдений и численного моделирования конвективных облаков, что особенно актуально при изучении процессов взаимодействия отдельных конвективных ячеек в грозо-градовых облаках. Известно, что именно многоячейковые градовые облака имеют наибольшую повторяемость во всех без исключения градоопасных регионах планеты [1]. Взаимодействие отдельных конвективных ячеек, составляющих многоячейковое облако, в значительной степени определяет характер его развития и, как следствие, продолжительность существования.

Одним из физических процессов, требующих детального исследования является процесс слияния конвективных ячеек. Результаты такого слияния зачастую приводят к формированию ячеек с характеристиками, значительно превосходящими их значения до начала процесса слияния [2, 3].

Причем сам механизм такого слияния не является особенностью только многоячейковых облачных систем. Аналогичные процессы отмечаются и при развитии суперячейковых градовых облаков, когда периферийные фидерные облака вовлекаются в систему основного восходящего потока [1]. Важность правильной научной интерпретации этих вопросов во многом определяется их большим прикладным значением при разработке методик воздействия на конвективные облака, используемых в различных проектах по модификации погоды. В связи с этим, основной целью настоящего исследования является комплексный анализ процесса слияния конвективных ячеек многоячейковой облачной системы, развивавшейся над центральной частью Северного Кавказа 07.06.2014 г. Основу экспериментального материала составили результаты непрерывных радиолокационных наблюдений, выполненных с помощью двухволнового метеорологического радиолокатора МРЛ-5, оснащенного автоматизированной системой сбора, обработки и анализа радиолокационной информации [4].

1. ПОГОДА В РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 07.06.2014 г.

Погода в районе исследования 07.06.2014 г. определялась барической ложбиной, связанной с вы-

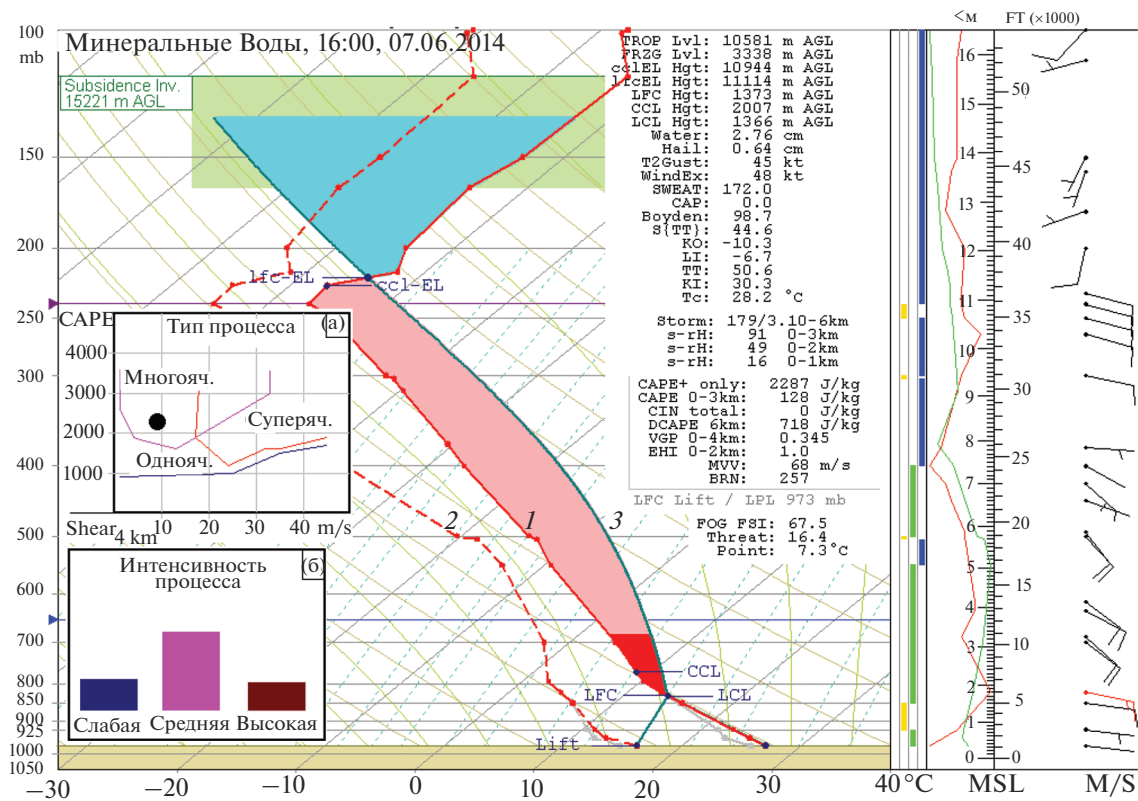


Рис. 1. Результаты температурно-ветрового зондирования атмосферы за 07.06.2014, 16.00 (метеостанция Минеральные Воды, 37055). Цифрами на рисунке обозначены: 1 – распределение температуры по высоте (кривая стратификации); 2 – распределение температуры точки росы по высоте; 3 – кривая состояния. На врезках (а) и (б) представлены результаты прогноза типа и интенсивности градового процесса, соответственно.

сотным циклоном над Турцией. Вдоль Кавказского хребта располагался теплый фронт, а прохождение холодного фронта первого рода с запада ожидалось во второй половине дня. Скорость прохождения холодного фронта прогнозировалась равной приблизительно 15 км/ч. Анализ термодинамического состояния воздушных масс в этот день проводился на основе данных температурно-ветрового зондирования тропосферы, выполненного на метеостанции Минеральные Воды (37055) в 12.00 ВСВ (16.00 по местному времени). По этим данным, высота нулевой изотермы составляла 3.65 км. Горизонтальные потоки в слое облакообразования не превышали 10 м/с, при отсутствии существенного сдвига ветра по скорости. На рис. 1 приводится график, где представлены данные радиозондирования (максимальные значения приземной температуры и температуры

точки росы скорректированы по данным автоматической метеостанции ВГИ табл. 1).

Атмосфера над районом радиолокационных наблюдений имела неустойчивую стратификацию, характерную для конвективных процессов средней интенсивности. Полная энергия неустойчивости атмосферы достигала 2287 Дж/кг. Существенный сдвиг ветра, как по скорости, так и по направлению отсутствовал. На врезке (а) приводится результат прогноза типа градового процесса для данного дня по соотношению полной энергии неустойчивости атмосферы и сдвига ветра. Как видно из приведенного на этой врезке графика, рассматриваемый процесс относится к многоячейковым процессам. На врезке (б) рис. 1 приводится графическая интерпретация прогноза интенсивности градового процесса по 40 основным термодинамическим параметрам атмосферы, таким как

Таблица 1. Данные наземных наблюдений в районе г. Нальчик

Время	t , °C	Влажн. %	Точка росы t °C	Скор. ветра м/с	Направл. ветра	Давл. мм	Осадки мм	Интенсивность дождя мм/ч
16:00	26,9	53	15,6	1,8	Е	734	0	0

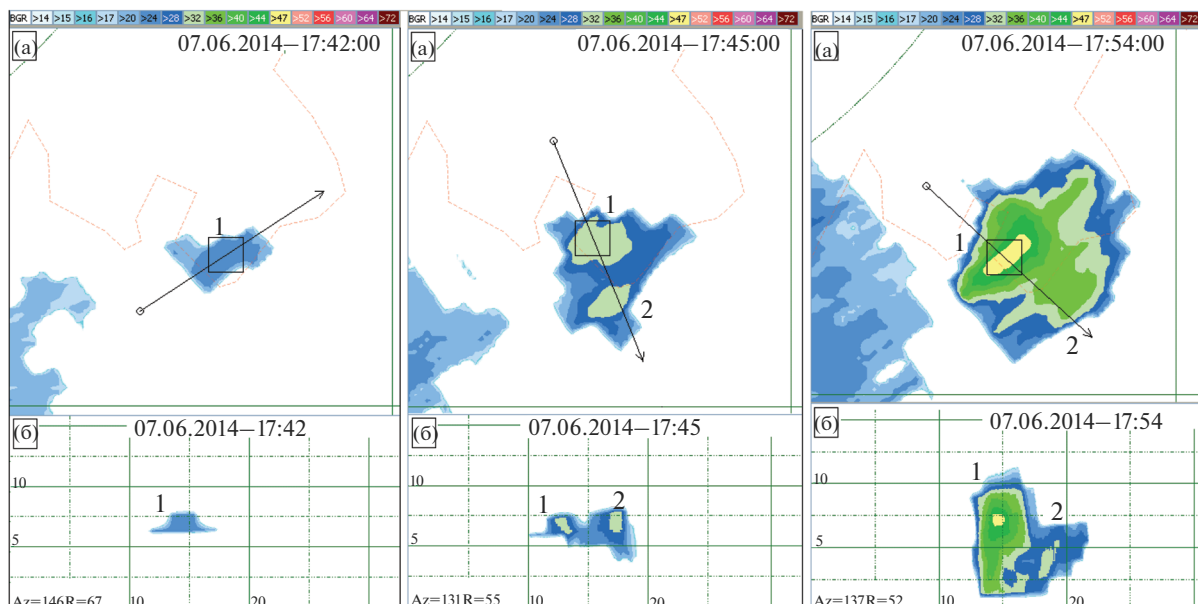


Рис. 2. Горизонтальная (а) и вертикальная (б) структура радиоэха ячеек 1 и 2 на стадии формирования исследуемого облака. Направления вертикальных разрезов указаны стрелками.

полная энергия неустойчивости, сдвиг ветра, градиенты температуры на различных уровнях, индексы Томпсона, Джеферсона, Боудена и т.д. Рассматриваемый процесс по этим параметрам относится к процессам средней интенсивности.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Первое радиоэхо исследуемого облака было зарегистрировано радиолокатором в 17 ч 42 мин юго-восточнее Нальчика, в районе административной границы между Кабардино-Балкарией и Северной Осетией. Для градовых процессов центральной части Северного Кавказа такое расположение первого радиоэха является наиболее часто повторяющимся (наряду с районом междуречья верховий рек Малки и Кубани). Фактически речь идет о двух устойчивых максимумах в распределении зон формирования первого радиоэха градовых ячеек в данном районе. Более детально эти вопросы рассмотрены в работах [5, 6].

На рис. 2 приводится горизонтальная (а) и вертикальная (б) структура радиоэха ячеек 1 и 2 на стадии формирования исследуемого облака.

Как видно из рисунка, в 17.42 конвективная ячейка 1 находится на ранней стадии своего развития. Высота верхней границы радиоэха H_v в это время составляет 8.0 км, а значение максимальной радиолокационной отражаемости $Z_{max} - 27$ dBZ. Осадки в ней еще не сформированы. Интенсивно развиваясь, уже через 12 мин, в 17.54, эта ячейка достигает градовой стадии, из нее отмечается вы-

падение мелкого града, крупы и ливневых осадков. Высота верхней границы радиоэха H_v в это время составляет 11.4 км, высота зоны, ограниченной контуром отражаемости 45 dBZ $H_{45} - 9.3$ км, а значение максимальной радиолокационной отражаемости $Z_{max} - 50$ dBZ. Правее ячейки 1, в том же облаке, в 17.45 регистрируется первое радиоэхо градовой ячейки 2. Именно такой порядок зарождения и смены градовых ячеек характерен для упорядоченных многоячеековых градовых процессов с правосторонним развитием. В 17.54 H_v ячейки 2 составляет 9.9 км, а $Z_{max} - 43$ dBZ. Обе ячейки интенсивно развиваются. Всего через 9 мин, в 18.03, H_v ячейки 1 составляет 11.7 км, $H_{45} - 6.8$ км, $Z_{max} - 52$ dBZ.

На рис. 3 приводится радиолокационная структура радиоэха исследуемого облака в 18:06 и в 18:20.

В 18.06 радиолокационные параметры ячейки 1 достигли своих максимальных значений ($H_v - 11.9$ км, $H_{45} - 10.9$ км, $Z_{max} - 59$ dBZ, высота зоны отражаемости 55 dBZ $H_{55} - 8.6$ км). Примерно в этот период между ячейками 1 и 2 формируется новая ячейка 3. В дальнейшем, в течение нескольких минут, ячейка 1 еще сохраняет максимальные значения своих радиолокационных параметров. Но уже в 18.12 начинается процесс слияния ячеек 2 и 3 и резкое падение параметров ячейки 1. Радиолокационная структура облака приобретает структуру классического упорядоченного многоячеекового градового процесса. Правый фланг облака активный и обновляющийся, там происходит зарождения новых ячеек, а на левом фланге - диссипация

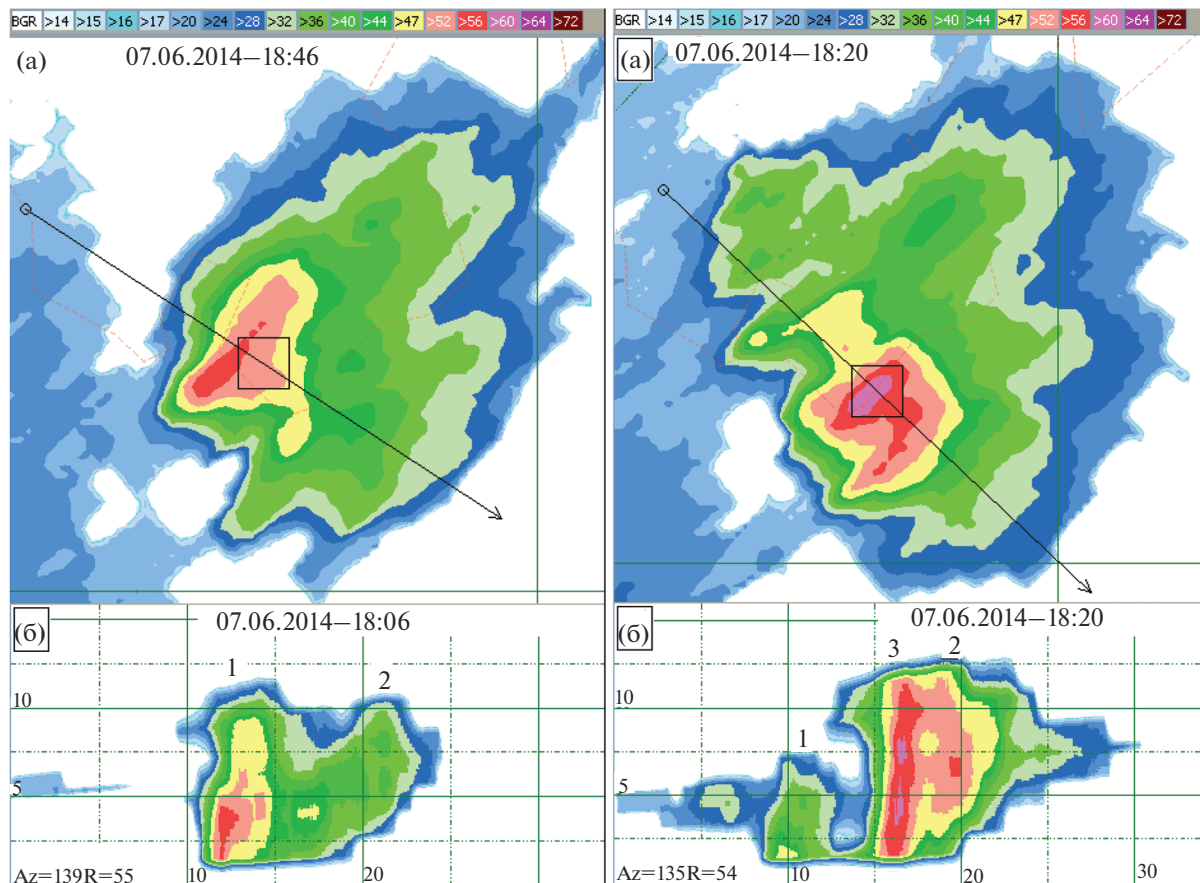


Рис. 3. Горизонтальная (а) и вертикальная (б) структура радиоэха ячеек 1, 2 и 3 в 18:06 и 18:20. Направления вертикальных разрезов указаны стрелками.

ячеек и выпадение осадков. В результате слияния ячейка 3 продолжает активно развиваться, в то время как параметры ячеек 1 и 2 стремительно уменьшаются. Уже через 8 минут, в 18.20, H_v ячейки 3 составляет 12.8 км, H_{45} — 11.8 км, H_{55} — 11.4 км, Z_{max} — 64 dBZ. Интересно отметить, что структура радиоэха ячеек в период слияния имеет вид, аналогичный приведенному в [3] для градового процесса, наблюдавшегося 10.08.2008 г. над континентальной Грецией. Возможно, что общие закономерности процесса слияния характерны для облаков различных физико-географических районов.

Как видно из рис. 3, в 18:06 ячейка 1 является доминирующей в облаке. Однако максимум радиолокационной отражаемости смещен в нижнюю часть радиоэха и расположен ниже нулевой изотермы. В течение ближайших циклов обзора она прекратит свое существование, и не будет больше регистрироваться радиолокатором как отдельная ячейка. В этот же период ячейка 3 достигает максимума своего развития. Ее вертикальный разрез в плоскости максимальной ра-

диолокационной отражаемости, приведенный на рис. 3, показывает, что даже область максимальной отражаемости (контур более 60 dBZ) расположена на высотах 7–9 км. Это — оптимальная зона для роста крупного града в облаке. Ячейка 3 сохраняет свои максимальные характеристики в течение более получаса. Это свидетельствует о наличии относительно непродолжительной стадии квазистационарности, характерной для суперячеевых градовых облаков и облаков переходного типа. К 18.44 градовые ячейки 1 и 2 полностью диссипировали и больше не регистрируются. Градовая ячейка 3 находится на стадии квазистационарности, значение максимальной радиолокационной отражаемости в это время составляет 64 dBZ. Однако, зона максимальной отражаемости, ограниченная контуром в 60 dBZ, расположена уже в нижней части радиоэха. Обычно это свидетельствует о начале разрушения облака и значительного уменьшения значений его основных характеристик.

На рис. 4 приводятся последовательные снимки вертикальных разрезов радиоэха данного облака в плоскости максимума радиолокационной

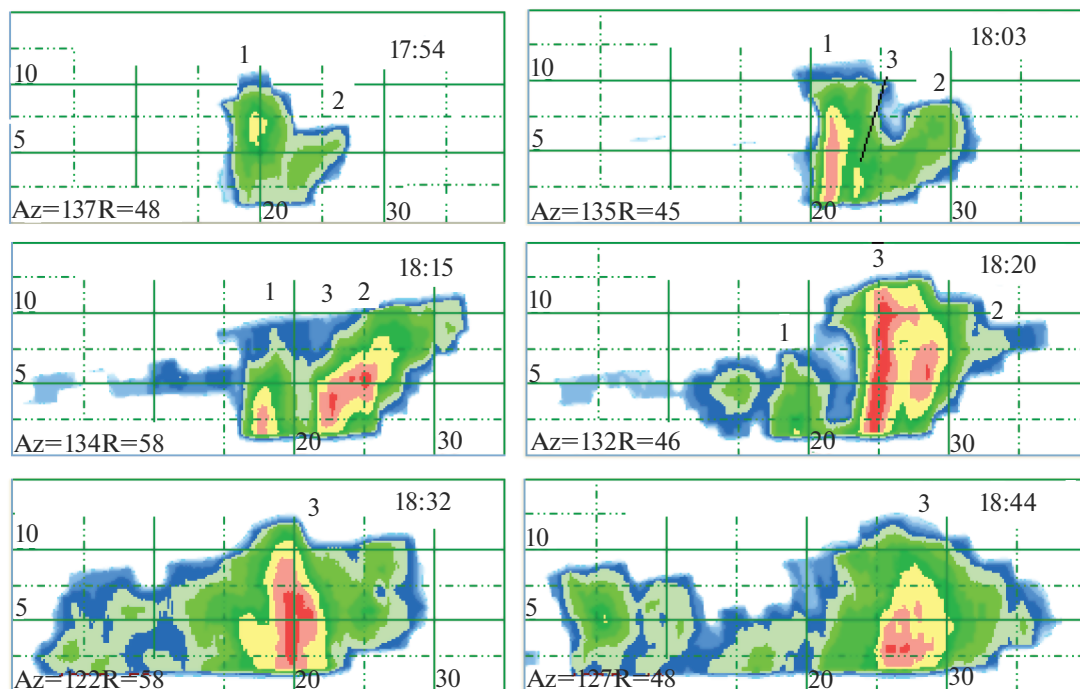


Рис. 4. Последовательные вертикальные разрезы радиоэха исследуемого облака в плоскости максимума радиолокационной отражаемости ячейки 3 по направлению расположения ячеек 1 и 2.

отражаемости ячейки 3 по направлению расположения ячеек 1 и 2.

Динамика развития отдельных ячеек облака в процессе слияния наиболее наглядно прослеживается при сравнении вертикальной структуры их радиоэха. Как видно из рис. 4, в 17.54 ячейка 1 представляет собой типичный пример развивающегося облака. Первые зарождающиеся осадки расположены в диапазоне высот от 6 до 8 км. Ячейка 2 в это время только формируется и не содержит частиц осадков. В 18.03 из ячейки 1 выпадают интенсивные осадки, ячейка 2 продолжает развиваться, высота ее верхней границы существенно увеличивается. Между ячейками 1 и 2 регистрируется появление ячейки 3. В 18.15 ячейка 1 уже находится на стадии диссипации, в то время как ячейки 2 и 3 сливаются на уровне контура радиолокационной отражаемости 47 dBZ. В результате слияния уже в 18.20 отмечается взрывной рост высот верхней границы радиоэха и зоны повышенной отражаемости ячейки 3. Эта ячейка становится доминантной в облаке. Радиолокационные параметры ячейки 2 уменьшаются. В дальнейшем в облаке регистрируется только ячейка 3. К 18.44 вертикальная радиолокационная структура ячейки 3 приобретает характерный вид разрушающегося облака.

На рис. 5 приводятся изменения во времени основных радиолокационных характеристик ячеек 1–3.

Как видно из рисунка, ячейка 1 имеет наименьшие значения всех радиолокационных параметров и наименее продолжительное время жизни. Параметры ячеек 2 и 3 до начала слияния (18.12) были примерно одинаковыми. Однако дальнейшее их развитие сильно различается. В результате слияния отмечается взрывной рост значений высот повышенной отражаемости H_{45} и H_{55} ячеек 2 и 3. Причем, наиболее резко изменилось значение H_{55} ячейки 3. С 18:15 до 18:20 это значение увеличилось с 5.0 км до 11.4 км, т.е. скорость роста высоты зоны повышенной отражаемости в этот период превышала 1 км\мин. Очевидно, что это происходило в основном за счет формирования крупных частиц на больших высотах. Проникновение областа, ограниченной контуром радиолокационной отражаемости 55 dBZ в зону отрицательных температур свидетельствует об увеличении концентрации частиц осадков в зоне роста града и увеличении объема переохлажденной части градового очага. С другой стороны, это указывает на наличие более протяженных траекторий растущих градин и, как следствие, увеличение времени нахождения частиц в области наиболее оптимальных термодинамических условий для роста крупного града. При этом для ячеек 2 и 3 время существования контура 55 dBZ составило 24 и 45 мин соответственно. Для ячейки 1 это значение существенно меньше – 9 мин. Примерно такое же соотношение отмечается и для времени существования

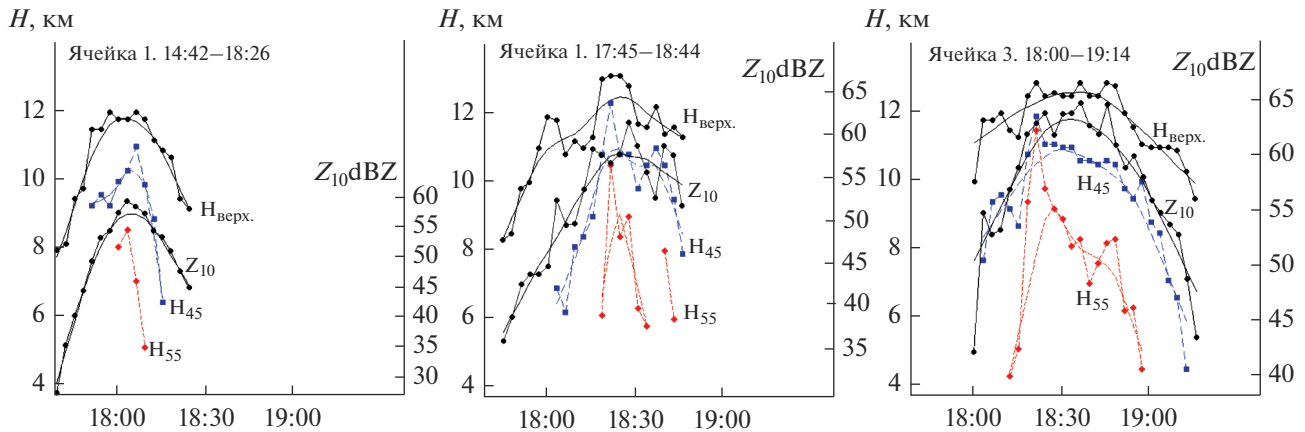


Рис. 5. Изменения во времени основных радиолокационных параметров ячеек 1–3. $Z_{\max}$ – максимальная радиолокационная отражаемость на длине волны $\lambda = 10$ см, $H_{\text{в.р.}}$ – высота верхней границы радиозона, H_{45} , H_{55} – высоты зон повышенной отражаемости, ограниченных контурами 45 и 55 dBZ, соответственно.

контура 45 dBZ – 24, 42 и 69 мин, соответственно для ячеек 1–3. Форма кривых временного хода основных радиолокационных параметров ячейки 3 с характерным плато в области максимальных значений свидетельствует о наличии стадии квазистационарности продолжительностью немногим более часа, что обычно свойственно суперячейковым градовым процессам и процессам переходного типа. В нашем случае речь идет именно о процессе переходного типа, когда в результате слияния ячеек наиболее интенсивная ячейка упорядоченного многоячейкового процесса достигает стадии суперячейки.

Таким образом, анализ радиолокационных данных по структуре и динамике развития трех конвективных ячеек показал, что в результате слияния ячеек 2 и 3 радиолокационные параметры обеих ячеек значительно увеличились. Ячейка 3 стала доминантной в исследуемом облаке, а продолжительность ее жизни существенно превысила аналогичные значения для ячеек 1 и 2. Максимальные значения радиолокационных параметров за все время существования облака отмечаются именно у ячейки 3, сформировавшейся в результате процесса слияния с ячейкой 2 и, впоследствии, ставшей доминантной.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАДА, РАССЧИТАННЫЕ ПО ДВУХВОЛНОВОМУ МЕТОДУ

Определение микрофизических параметров градовых облаков проводилось двухволновым радиолокационным методом, реализованным на автоматизированном комплексе MeteoX [4]. При этом расчет величин радиолокационной отражаемости града для двух длин волн выполнялся исходя из известного соотношения для радиолокационной отражаемости:

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

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 градины; $n_{\text{гр}}(r)$ – функция распределения градин по размерам.

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

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

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

Для случая двух длин волн имеет место система уравнений, связывающих радиолокационную отражаемость со среднекубическим диаметром (d_3) и концентрацией (N) града в облаке (при параметризации остальных характеристик):

$$\eta_{3.2} = A_1 N d_3^{\alpha_1}, \quad \eta_{10} = A_2 N d_3^{\alpha_2}. \quad (3)$$

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 . Более подробные алгоритмы расчета всех используемых параметров представлены в [6, 7].

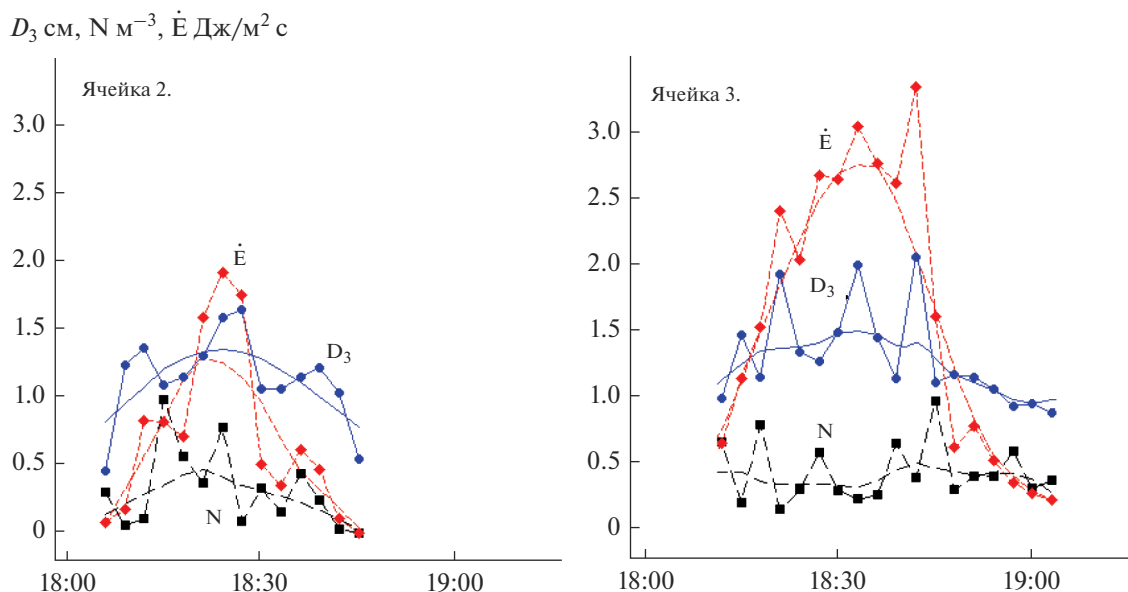


Рис. 6. Временной ход значений среднекубического диаметра D_3 и концентрации N града в облаке, а также потока кинетической энергии выпадающего града у поверхности земли $\dot{E}$ для ячеек 2 и 3.

На рис. 6 приводятся распределения по времени значений среднекубического диаметра D_3 и концентрации N града в облаке, а также потока кинетической энергии выпадающего града у поверхности земли $\dot{E}$.

Как видно из рис. 6, время существования града в облаке для этих двух ячеек существенно различается. В ячейке 2 град индентировался с 18:06 до 18:45, а в ячейке 3 — с 18:12 до 19:03, т. е. продолжительность существования градового очага составила 39 и 51 мин, соответственно для ячеек 2 и 3. В ячейке 2 максимальное значение среднекубического диаметра градин в спектре достигало 1.65 см. С учетом используемой функции распределения частиц по размерам, соотношение между среднекубическим и максимальным диаметрами градин в спектре имеет вид $d_{\text{макс.}} = 2.11d_3$, т. е. максимальный размер града в ячейке 2 достигал 3.48 см. В ячейке 3 эти значения составили $d_3 = 2.15$ см и $d_{\text{макс.}} = 4.54$ см. Как известно, размер града в значительной степени зависит от скорости восходящего потока в облаке, водности и от их оптимального соотношения в зоне роста града. Оба эти параметра определяются термодинамическим состоянием атмосферы в день развития конвекции. Как было показано выше, данные температурно-ветрового зондирования атмосферы в этот день (рис. 1) свидетельствовали о возможности развития конвективного процесса средней интенсивности, что полностью соответствует результатам радиолокационных наблюдений. Слияние ячеек 2 и 3 в данном случае стимулировало интенсификацию микрофизических процессов, что и опреде-

лило рост крупного града в этих ячейках и длительность его выпадения.

Максимальные значения потока кинетической энергии выпадающего града $\dot{E}$ для ячеек 2 и 3 составили соответственно 1.92 и 3.33 Дж/м² с. Как известно, этот параметр для реальных градобитий меняется приблизительно в пределах от 0.1 до 10 Дж/м² с [8, 9]. Как видно из рис. 5, максимальное значение $\dot{E}$ для ячейки 2 отмечается в 18:24. В это время ячейки 2 и 3 находились в процессе слияния и были объединены контуром радиолокационной отражаемости 47 dBZ. Максимальное значение $\dot{E}$ для ячейки 3 отмечалось на 18 минут позже в 18:42, когда ячейка 2 уже находилась на стадии диссипации. Взрывной рост высоты зоны повышенной отражаемости ячейки 3, ограниченной контуром 55 dBZ в 18:20 (рис. 3 и 4) свидетельствует о резком увеличении объема зоны роста града. По этой причине отмечается более продолжительное выпадение града из ячейки 3. Причем для роста крупных градин необходимо более длительное пребывание в области с оптимальными для роста условиями. Именно поэтому максимум потока кинетической энергии града для ячейки 3 оказался сдвинут во времени на 18 минут.

Таким образом, в результате слияния конвективных ячеек 2 и 3 отмечается интенсификация микрофизических и динамических процессов, что в значительной степени определило рост крупного града в этих ячейках и продолжительность его выпадения. Максимальные значения размера града и потока кинетической энергии его выпадения отмечались при развитии ячейки 3, которая, в результа-

те слияния, трансформировалась в доминантную ячейку всей облачной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosenfeld D., Woodley W.L., Krauss T.W., Makitov V. Aircraft microphysical documentation from cloud base to anvils of hailstorms feeder clouds in Argentina // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2006. V. 45. P. 1261–1281.
2. Краус Т.В., Синькевич А.А., Веремей Н.Е., Довгало Ю.А., Макитов В.С., Степаненко В.Д. Комплексное исследование характеристик кучево-дождевого облака, развивавшегося над Аравийским полуостровом в условиях большого дефицита точки росы в атмосфере. Часть 1. Натурные наблюдения и численное моделирование // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 2. С. 44–59.
3. Karacostas T. et al. Analysis and numerical simulation of a real cell merger using a three-dimensional cloud resolving model, *Atmospheric Research*, 2016. V. 169. P. 547–555.
4. Инюхин В.С., Сулов В.В. Алгоритмы автоматизированного распознавания и анализа радиоэха облаков // *Труды ВГИ*, 2010. № 96. С. 89–100.
5. Газзеева З.А., Макитов В.С. Распределение траекторий перемещения многоячейковых градовых процессов на Северном Кавказе // *Труды ВГИ*. 1991. № 80. С. 93–99.
6. Инюхин В.С., Куцев С.А., Лиев К.Б., Макитов В.С. Радиолокационные исследования распределения зон формирования первого радиоэха градовых облаков // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 6. С. 1–8.
7. Инюхин В.С., Куцев С.А., Чередник Е.А., Макитов В.С. Динамические характеристики отдельных градовых ячеек центральной части Северного Кавказа по данным радиолокационных наблюдений // *Труды ВГИ*. 2013. № 99. С. 41–51.
8. Waldvogel A., Schmid W., Federer B. The kinetic energy of hailfalls: Part I. Hailstone spectra // *J. Appl. Meteorol.* 1978. V. 17 (11). P. 515–520.
9. Makitov V. Radar measurements of integral parameters of hailstorms used on hail suppression projects // *Atmospheric Research*. 2007. V. 83. P. 380–388.

Hail Cloud Formation as a Result of the Merge of Convective Cells

V. S. Makitov¹, *, V. S. Inuhin¹, S. A. Kushchev¹, and K. B. Liev¹

¹ High-Mountain Geophysical Institute, pr. Lenina, 2, Nalchik, 360030 Russia

*e-mail: Stasuk6@mail.ru

The results of long term continuous radar observations of the multicellular hail system developing over the central part of the North Caucasus 07.06.2014 are presented. The issues of the interaction of individual convective cells in the system of a single radio echo complex, discussed in detail. The main focus of the study is formation of a hail cloud as a result of the merger of individual convective cells of the complex. The change of the main radar parameters and microphysical characteristics of hail in the cloud during the cell merger is analyzed. It has been shown that as a result of the merge of convective cells, there is an intensification of microphysical and dynamic processes, which significantly contributes to the growth of large hail and an increase of the duration of the hail stage.

Keywords: hail, hail cell, multi-cell hail processes, first radar echo, dual-wavelength hail detection method