

МЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК:551.576:551.501.8

Е.И. Данов, Т.Е.Данова**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ
ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ ДВУХВОЛНОВЫМИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ
ЛОКАТОРАМИ**

Исследуются радиолокационные параметры конвективных облаков на ранней стадии развития в Причерноморье с момента появления первого радиоэха до достижения максимальных значений. Выявлено, что облачные ячейки, зарождавшиеся в области температур $-10,0\sim-31,0^{\circ}\text{C}$, с большой степенью вероятности станут градовыми, при этом динамические параметры растущих ячеек, характеризующие скорость изменения во времени максимальной радиолокационной отражаемости, высот облака и зоны повышенной водности в нем, достигают максимальных значений, а размер града определяется временем роста указанных параметров. Полученные закономерности могут быть использованы в практике сверхкраткосрочного прогноза ливня и града для предотвращения градобития.

Ключевые слова: метеорологические радиолокаторы, динамические параметры, сверхкраткосрочный прогноз града.

Введение

Градовые облака относятся к разряду наиболее мощных конвективных облаков, нередко проникающих в тропосферу, обладающих значительным водозапасом, имеющих колоссальные площадные и объемные характеристики. Наличие в таких облаках интенсивных восходящих движений создает условие накопления объемных зарядов, образования и роста града, возникновения сильной турбулентности, а вблизи поверхности земли – образования шквалов и смерчей [11, 13, 14].

Реализация мощных грозоградовых процессов, сопровождающихся опасными явлениями погоды, достойна пристального внимания специалистов, которые занимаются прогнозированием погоды, изучением климата, спутниковой и радиолокационной метеорологией. Потребителем информации о закономерностях процессов облако- и осадкообразования выступает экология, поскольку выпадающие осадки способны очищать атмосферный воздух от естественных и антропогенных примесей.

Необходимы регулярные и непрерывные сведения о зарождении и эволюции конвективных облаков при проведении активных воздействий на погоду и оценке их эффективности [9]. Предотвращение опасных градобитий, искусственное увеличение осадков, их территориальное перераспределение, выбор стратегии засева таких облаков возможны только при оперативном получении радиолокационной информации об объекте воздействия – мощном конвективном облаке [1, 2, 4]. Быстротечность и локальность мощных конвективных процессов, нередко с катастрофическими последствиями (шквалистый ветер, крупный град, интенсивные ливни, грозы), определяют необходимость разработки сверхкраткосрочных прогнозов, с заблаговременностью 10-20 мин., известных в ВМО как «Nowcasting» [16].

На протяжении многих лет на всей территории бывшего Советского Союза использовались двухволновые радиолокационные станции метеорологического назначения типа МРЛ-5, которые позволяли решать задачи градозащиты и штормового оповещения [12]. Несмотря на то, что со временем эти станции морально и физически устаревают и их количество сокращается, в

© Данов Е.И., Данова Т.Е., 2015

Данов Евгений Иванович, начальник Одесской военизированной службы по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, кандидат географических наук; Украина 65070, г. Одесса, ул. Варненская, 20

Данова Татьяна Евгеньевна, кандидат географических наук, доцент кафедры физики атмосферы и климатологии Одесского государственного экологического университета; Украина 65016, г. Одесса, ул. Львовская, 15; danova8@mail.ru

некоторых странах постсоветского пространства модернизированные МРЛ-5 продолжают работать. Большой производственный опыт (1981-2012 гг.) по активным воздействиям на погоду и сопровождающие научные исследования, проходившие на полигоне Одесской военизированной службы по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, позволили усовершенствовать имеющиеся методики и разработать новые для сверхкраткосрочного прогноза грозоградовых явлений [6, 7].

В современных проектах по воздействию на атмосферные процессы существенная роль принадлежит радиолокационному исследованию облачных ячеек и их систем, что позволяет оценить, по комплексу радиолокационных характеристик, эволюцию облаков как при естественном их развитии, так и в результате засева. Несмотря на различие региональных условий формирования динамики облакообразующего процесса, структуры облачных ячеек и их комплексов на разных стадиях развития имеет ряд общих закономерностей, присущих различным климатическим зонам мира [2, 3, 13, 14]. Последнее обстоятельство позволяет классифицировать эти процессы по структурно - морфологическим признакам в ряде регионов [2, 8, 14]. С другой стороны, известно, что продолжительность и интенсивность процесса облако- и осадкообразования определяется взаимодействием макропроцессов с орографическими особенностями конкретного региона, и поэтому важность выявления региональных отличий градовых процессов трудно переоценить с позиции прогнозирования времени и места реализации особо опасных явлений.

Цель исследования заключается в упрощении интерпретации информации, получаемой с помощью МРЛ-5 при исследовании динамики развития радиоэха конвективных облаков, которые в процессе эволюции достигают градовой стадии. Одним из этапов работы является выявление закономерностей в трансформировании структуры радиоэха таких облаков и связи основных параметров радиоэха с интенсивностью градового процесса и определение возможности использования полученных закономерностей для сверхкраткосрочного прогноза развития градового процесса.

Исходные данные и методика исследования

Анализ динамики развития конвективных ячеек проводился на Одесском противорадовом полигоне с площадью около 500 км², ограниченном с юга морским побережьем, на севере – границей с Молдовой. Радиолокационные наблюдения осуществлялись двухканальной станцией типа МРЛ-5 в режиме непрерывного слежения за эволюцией радиоэха отдельных ячеек и их комплексов в период с апреля по сентябрь 1987-1993 гг. и 2001-2012 гг., что позволило получить широкий спектр параметров радиоэха облачных ячеек.

Методика наблюдений, в соответствии с [12], предусматривала:

- измерение радиолокационной отражаемости Z_{max} ;
- определение высот верхней границы радиоэха H_v , зоны повышенной водности H_9 , ограниченной изоэхом с отражаемостью, равной $z=1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}$, а также расчет превышения DN_v и DN_9 над уровнем моря нулевой изотермы;
- фоторегистрацию структуры радиоэха на экранах ИКО и ИДВ при углах наклона, соответствующих высотам 1, 2, 4, 6, 8, 10 и 12 км над уровнем моря, с дискретностью во времени не более 5-10 мин.

Проводилось исследование облаков, находящихся в радиусе до 100 км; время наблюдений за одной ячейкой с момента появления первого радиоэха до его исчезновения составляло от десятков минут до нескольких часов. Разделение ячеек на градовые и ливневые производилось по размеру рассеивающих частиц в облаке, оцененного с помощью двухволнового метода [12]. Характер выпадающих осадков уточнялся наземными сведениями учащенной сети наблюдений, оперативными данными о градобитиях, полученными от сельскохозяйственных организаций.

Результаты исследования и их анализ

В радиолокационных исследованиях за начало жизни облачной ячейки принято считать момент появления первого радиоэха, т. е. первичного сигнала в виде засветки на экране радиолокатора ИКО или ИДВ, отраженного от конвективного облака, наблюдаемого визуально. Появление первого радиоэха связано с переносом восходящими потоками зародышевых ледяных частиц в

области с повышенным влагосодержанием, где рост этих частиц происходит достаточно быстро [15].

В соответствии с представлением о процессе градообразования, высота первого радиоэха облака, т.е. наименьший объем облачных частиц, впервые обнаруженный радиолокационной станцией, определяет дальнейшую судьбу – станет ли облако впоследствии градовым или ливневым.

Оптимальным уровнем зарождения первого радиоэха потенциально градовых ячеек, по мнению авторов [1, 15, 16], является атмосферный слой 5-9 км, находящийся в температурном интервале -5,0~-30,0°C, т.е. высота появления первого радиоэха градовых ячеек тесно связана с кристаллизацией облачных капель. В Причерноморье первое радиоэхо градовых ячеек в 80 % случаев обнаруживается на уровне температур < -10,0°C, независимо от типа градового процесса [6].

Понятие первого радиоэха с точки зрения величины отраженного сигнала различно у разных авторов. Так, если в [15] первое радиоэхо фиксируется при 5 дБ, то у других авторов эта величина составляет 20 или даже 30 дБ [16]. В Северном Причерноморье первое радиоэхо обнаруживается при 6 дБ, при отражаемости на втором канале станции при длине волны $\lambda=10,0$ см, равной $h_{10}=5\text{Ч}10^{-12}$ ч $1\text{Ч}10^{-11}\text{см}^{-1}$ [6].

Анализ включал выборку из 174 случаев обнаруженных первых радиоэхо – конвективных ячеек, из них в 125 случаях облака в процессе своего развития становились градовыми; остальные 49 в дальнейшем были отнесены к ливневым. Выяснилось, что независимо от типа градового процесса среднее значение высоты обнаружения первого радиоэха $\bar{H}_{\text{пр}}$ близко к 6,0 км (в Молдове и на Северном Кавказе – 6,1 км). Таким образом, $H_{\text{пр}}$ градовых ячеек, независимо от региона исследования, обнаруживается в облачном слое, температура которого соответствует естественной кристаллизации облачных капель в интервале -3,0ч-31,0°C (табл.). При зарождении ячеек вблизи нулевой изотермы и в области положительных температур они редко достигают градовой зрелости.

Первое радиоэхо потенциально ливневых облаков появляется, как правило, вблизи нулевой изотермы; по данным Е.Е. Корниенко для юго-восточной части Украины $\bar{H}_{\text{пр}}$ составляет 3-4км [10].

Повторяемость $H_{\text{пр}}$ градовых ячеек в Причерноморье в температурном интервале по градациям, %

Температура $H_{\text{пр}}$, °С						Число случаев	
> -5	-5 ÷ -10	-10 ÷ -15	-15 ÷ -20	-20 ÷ -25	-25 ÷ -30		< -30
6	13	22	26	19	11	3	125

Дальнейшая судьба радиоэха определяется динамикой его развития. Время развития облачной ячейки определяется продолжительностью периода от момента появления первого радиоэха до достижения параметрами ячейки максимального значения; время квазистационарного состояния характеризуется постоянством параметров или незначительной флуктуацией их значений, а период диссипации – моментом начала устойчивого уменьшения значений параметров радиоэха до полного его исчезновения.

Для ячеек, обнаруженных визуально до момента появления первого радиоэха, в среднем проходит около 30 мин. [11]; для ливневых облаков со слабой интенсивностью осадков этот период может быть более продолжительным [16], а для градовых ячеек он составляет обычно 10-20 мин. [6].

После появления первого радиоэха высокозарождающихся ячеек отмечается быстрый рост как самого радиолокационного сигнала, так и геометрических размеров ячейки. Через 3-5 мин. после появления первого радиоэха достигает максимального значения верхняя граница зоны повышенного радиоэха $H_{\text{дз}}$, характеризующая область высокой влажности, через 5-10 мин. наступает максимум z_{10} , а через 10-15 мин. – верхней границы облака $H_{\text{в}}$.

В период «взрывного» роста радиоэха значения $H_{Дв}$ и $H_{в}$ могут практически не различаться. Бурный, стремительный рост отражаемого сигнала в стадии первого радиоэха потенциально градового облака может быть объяснен увеличением размера облачных частиц, когда величина эффективной площади рассеяния u пропорциональна d^6 (релеевская область рассеяния).

Известно, что отраженный от облака сигнал формируется совокупностью гидрометеоров (капли, кристаллы, градины) и зависит как от длины падающей волны l (см), так и количества и размера рассеивающих частиц в единице объема (в m^3 или cm^3). Такая характеристика метеоцелей, определяющая, в конечном счете, водность облака, называется радиолокационной отражаемостью z :

$$z = \int_0^{\infty} N(D) u_i(D, l) dD, \quad (1)$$

где D – размер гидрометеоров;

N – количество отражающих частиц в единице объема;

u_i – эффективная площадь рассеяния отдельного гидрометеора.

Для области малых частиц, когда $D \ll l$ (релеевская область рассеяния), что характерно для зарождающейся облачной ячейки, справедливо выражение для u_i :

$$u_i = \frac{p^5}{l^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 d^6, \quad (2)$$

где $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ для капель воды близко к единице, а для ледяных частиц равно 0,19. Условием

«малости» частиц является соотношение:

$$\frac{pd}{l} \leq 0,126, \quad (3)$$

где d – размер рассеивающих частиц.

Однако значение радиолокационной отражаемости града примерно до $\frac{pd}{l} = 0,4$ отличается от релеевских незначительно [12], потому резкий всплеск этой характеристики в момент появления первого радиоэха можно объяснить ростом частиц, именно в релеевской области рассеяния, когда отраженный сигнал пропорционален d^6 .

Одновременно с ростом максимальной отражаемости z_{max} наблюдается быстрый рост $H_{в}$ и $H_{Дв}$, что объясняется выделением теплоты замерзания облачных капель и, как следствие, увеличением вертикальных скоростей воздушных потоков. Согласно [14], средние скорости роста вершины кучево-дождевых облаков находятся в пределах 1-6 м/с, однако в случае мощных градовых процессов они могут достигать 10-15 м/с и более [6]. Для области повышенной водности в облачных ячейках, которые в процессе своего развития становились градовыми, скорость роста $H_{Дв}$ может достигать 40-60 м/с и более.

По данным экспериментальных наблюдений за развитием конвективных облаков в Причерноморье рост радиолокационных параметров в растущей ячейке имеет пульсационный характер, причем градоопасное облако формируется при максимальных скоростях роста z_{max} , $H_{в}$, $H_{Дв}$. Изменение во времени этих параметров радиоэха отражает динамику облакообразующих процессов, поэтому их удобнее называть динамическими параметрами $V_{z_{max}}$, $V_{H_{в}}$, $V_{H_{Дв}}$ [6].

В стадии роста облака указанные параметры могут расти как одновременно, так и порознь, и при увеличении значений одних другие могли некоторое время оставаться без изменений или даже незначительно уменьшаться. Однако во всех случаях выпадению града предшествует значительный рост одновременно всех параметров, а продолжительность такого устойчивого роста, очевидно, тесно связана с размером града.

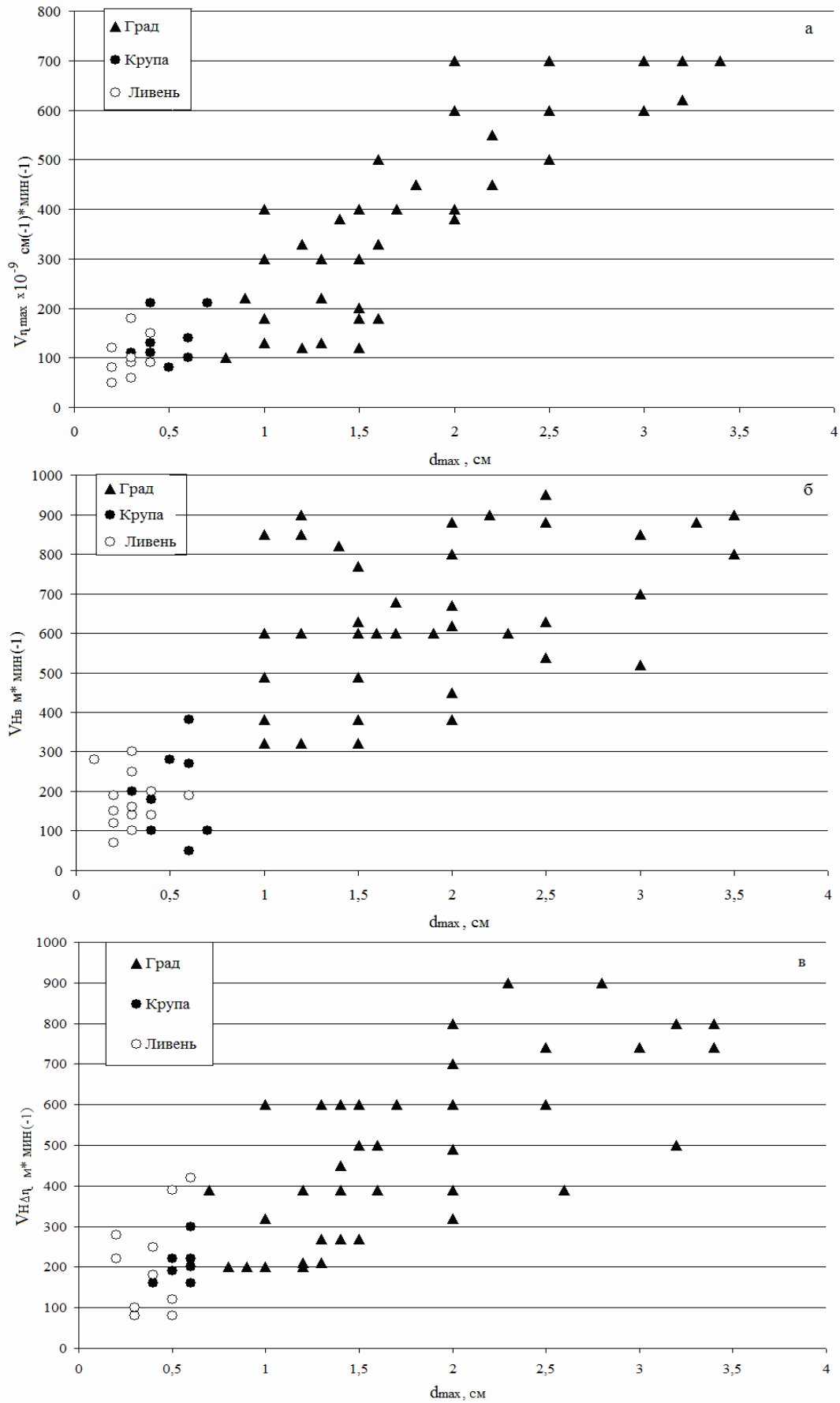


Рис. 1. Зависимость размера града от значения динамических параметров V_{zmax} (а); V_{HB} (б); V_{HDL} (в)

Определяющее значение как прогностического критерия градового облака принадлежит скорости роста максимальной отражаемости $V_{z_{max}}$, среднее значение этого критерия от момента появления первого радиоэха до максимальной величины превышает $14 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}/\text{мин}$. Важно, чтобы рост отраженного сигнала сохранялся при переходе через значение $z_{10} = 54 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}$, что соответствует наличию в таком облаке крупных капель, являющихся зародышами града или крупы.

Практика показала, что для образования потенциально градовых ячеек необходимым условием является продолжительность роста одного или нескольких параметров одновременно в течение нескольких минут (от 2 до 10, для крупного града больше).

На рис. 1 приведены результаты экспериментальной проверки зависимости размера выпавшего града от значений динамических параметров $V_{z_{max}}$, $V_{Hв}$, $V_{HДз}$ по материалам наблюдений за периоды 1995-1996 гг. и 2001-2012 гг., включающих по 50 случаев с градом и ливнем.

Поле точек на рис.1,б и 1,в характеризуется большей рассеянностью, однако для мощных градовых облаков суперячейкового типа с крупным градом $V_{Hв}$, $V_{HДз}$ в отдельные моменты могут достигать значения 1000 м/мин. Как видно, наиболее тесная связь наблюдается между размером выпадающего града и динамическим параметром $V_{z_{max}}$ (рис. 1, а), а ливням, как правило, предшествовало значение $V_{z_{max}}$ меньше критического.

Параметры H_v , $H_{Дз}$ в стадии зрелости ячеек могут неоднократно достигать максимальных значений, а затем несколько уменьшаться, в то время как z_{max} является более консервативной характеристикой и меняется слабо на протяжении стадии квазистационарного состояния облака.

Предложенная методика интерпретации скорости изменения радиолокационных характеристик может быть использована для увеличения экономической эффективности активных воздействий на градоопасные облака. Результаты многолетних исследований позволили построить график увеличения радиолокационной отражаемости с разной скоростью, для этих профилей были построены логарифмические тренды.

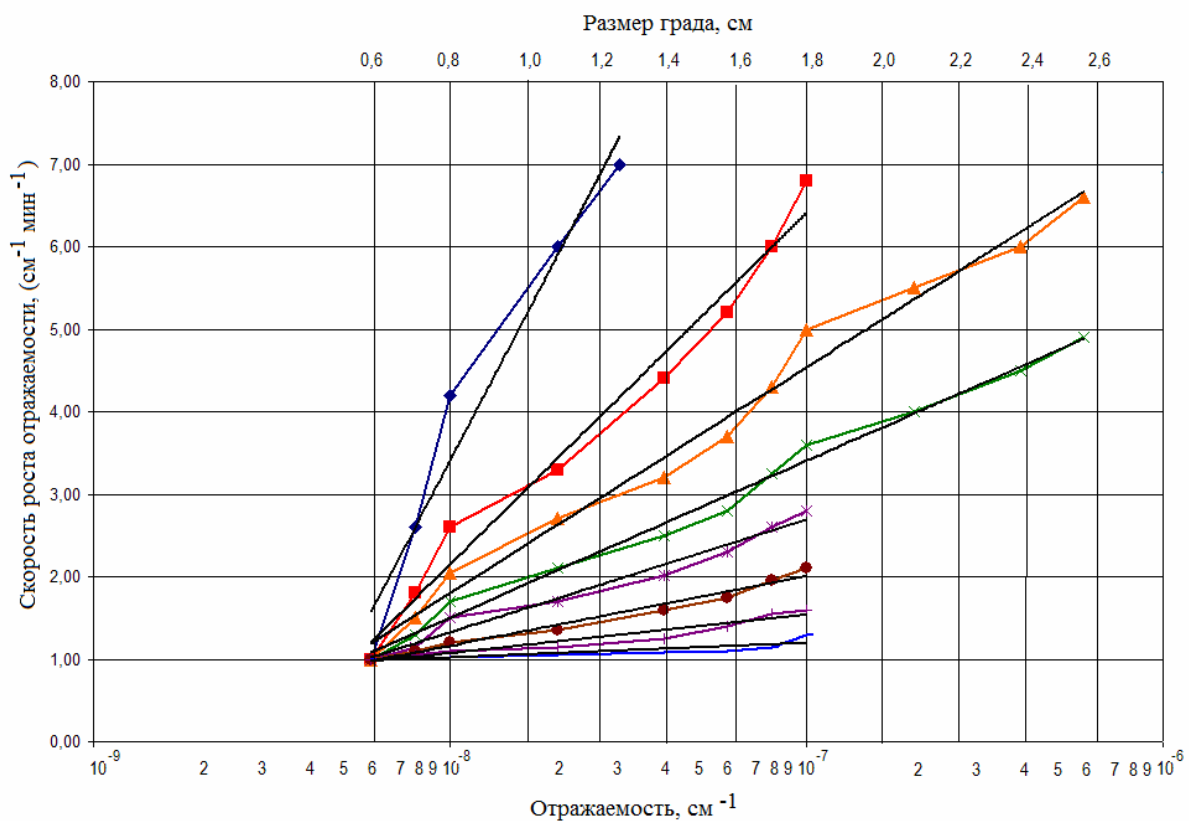


Рис. 2. Диаграмма определения градоопасности облаков по радиолокационной отражаемости и скорости ее увеличения

Диаграмма определения градоопасности облаков по радиолокационной отражаемости и скорости ее увеличения представлена на рис. 2.

Анализ случаев наблюдений за градоопасными облаками позволил рассчитать и построить диаграмму для оперативного определения размера града по скорости увеличения максимальной радиолокационной отражаемости по времени сохранения или увеличения этой скорости (рис. 2).

Проведение непрерывных радиолокационных наблюдений за развитием мощных конвективных облаков, находящихся в предградовой стадии, позволяет получить последовательные отсчеты максимальной радиолокационной отражаемости и скорость ее роста.

Использование предложенного комплекса критериев, которые определяют необходимость начала воздействия, позволяют уменьшить на 1/3 число профилактических экспериментов и сократить расход реагента на них за сезон на 25-30 %.

Заключение

Выводы, полученные на основании анализа экспериментальных радиолокационных наблюдений за развитием конвективных облаков, можно охарактеризовать следующим образом:

1. Первое радиоэхо градовых облачных ячеек в Причерноморье возникает на высоте 5,2-6,2 км, преимущественно в температурном интервале $-10 \div -31^\circ\text{C}$, соответствующем естественной кристаллизации облачных капель. При зарождении ячеек вблизи уровня нулевой изотермы и в области положительных температур они, как правило, становятся ливневыми.

2. В стадии развития градовых облаков рост радиолокационной отражаемости z_{\max} , верхней границы облака H_v , а затем и зоны повышенной влажности $H_{Дз}$ в нем носит «взрывной» характер, обусловленный процессом замерзания крупных капель, сопровождающийся выделением теплоты замерзания. Скорости роста V_{H_v} , $V_{H_{Дз}}$ в предградовой стадии облака могут достигать 1000 м/мин, а размер града определяется продолжительностью роста указанных параметров.

3. Выявленные особенности зарождения и развития радиоэха конвективных облаков имеют важное значение для сверхкраткосрочного (10-20 мин) прогноза ливня или града, образования новых облачных ячеек и развития их до градовой стадии; они позволяют распознавать потенциально градовые облака и своевременно произвести их засев оптимальным количеством реагента на ранней стадии развития с целью подавления града.

Библиографический список

1. Абшаев М.Т. О новом методе воздействия на градовые процессы //Труды ВГИ. 1989. Вып.72. С.14-28.
2. Абшаев М.Т. Структура и динамика развития грозоградовых процессов Северного Кавказа // Труды ВГИ. 1984. Вып. 53. С.6-22.
3. Данов Е.И., Данова Г.М., Сальманович Р.П. Особенности развития кучевых облаков в Гиссарской долине// Труды САРНИГМИ. 1975. Вып. 30(111). С. 27-31.
4. Данова Т.Е. К вопросу сверхкраткосрочного прогноза града по данным радиолокационных наблюдений в Причерноморье// III Международная научно-практическая конференция «Динамика научных исследований – 2004», 21-31 июня 2004г.: матер. конф. Днепропетровск, 2004. С. 10-11.
5. Данова Т.Е. Особенности динамики развития радиоэха градовых облаков в условиях Причерноморья// Труды VI-XIX "Всероссийского симпозиума по радиозондированию природных сред". СПб., 2002. С.357-359.
6. Данова Т.Е. Особенности динамики развития радиоэха градовых облаков в условиях Причерноморья// XVI-XIX Всероссийские симпозиумы «Радиолокационное исследование природных сред»: труды симп. СПб., 2002. Вып. 2. С. 357-361.
7. Данова Т.Е. Радиолокационные характеристики ночных гроз в Причерноморье// Вісник Одеського державного екологічного університету. Одеса, 2008. Вип.5, С. 137-141.
8. Данова Т.Е. Региональные особенности типизации градовых процессов в Причерноморье// Метеорологія, кліматологія та гідрологія: міжвідомчий науковий збірник України. Одеса, 2002. № 46. С. 137-144.
9. Данова Т.Е. Требования к гидрометеорологической информации, получаемой от радиолокационных станций // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.. Харьков, 2013. №175. С. 134-141.

10. Корниенко Е.Е. Структура и эволюция некоторых типов кучево-дождевых облаков // Труды УкрНИГМИ. 1980. Вып. 172. С. 3-70.
11. Облака и облачная атмосфера/под ред. Мазина И.П., Хргиана А.Х. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 720 с.
12. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 232 с.
13. Browning K.A. The structure and mechanism of hailstorms. Met. Mon., 1977, v. 16, JMb 38. P.45-47.
14. Chisholm A.J., Renick J.H. Supercelle and multicell Alberta hailstorms. In. Proc. Intern. Cloud Physics Conf., London, 1972. P.67-68.
15. Knight C.A., Hail W.D., Raskowski P.M. Visual cloud histories related to first radar echo formation in northeast Colorado cumulus. J. Clim. And Appl. Meteorol., 1983, v.22, #6. P. 1022-1040.
16. NHRE, 1982: Hail storms of the central High Plains, Colorado Associated University Press, Boulder, Colorado. 282 p.

E.I. Danov, T.E. Danova

INTERPRETATION OF THE RESULTS OF RADAR OBSERVATIONS HAIL CLOUDS BY USING TWO-WAVE MRL

Parameters of convective clouds in the early stage on the Black Sea Coast from the moment of occurrence of the first radioecho up to a maximum are investigated. It was revealed that the cloud cell nascent in the temperature of $-10,0\sim-31,0^{\circ}\text{C}$, with a high degree of probability will de hail, and the dynamic parameters of the growing cells which characterize rate of change in time of maximum radar reflectivity of the cloud height and zone of increased water content inside are defined. The size of a hail depends on time of growth of the specified parameters. These patterns can be used in practice over the short-term forecast of shower and hail, to prevent hail.

Key words: radar meteorological, dynamic parameters, short-term forecast of shower and hail.

Evgeniy I. Danov, Director of Odessa Uniformed Services on Active Influence on Hydrometeorological processes; Ukraine 65070, Odessa, 20 Varnenskaya St.

Tatyana E. Danova, Candidate of Geographic Sciences, Reader of Atmospheric Physics and Climatology Department, Odessa State Environmental University; Ukraine 65016, Odessa, 15 Lvovskaya St.; danova8@mail.ru

УДК 551.501.8.:551.509.322

Н.И. Толмачева

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ОБЛАКАХ И БЕЗОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

Рассмотрены пульсации скорости ветра и температуры в облаках, турбулентные участки в облаках и безоблачном пространстве, интенсивность турбулентности. Показана возможность комплексного использования аэрологической и радиолокационной информации для изучения особенностей развития турбулентности в облачной среде. Выявлены зависимости характеристик турбулентности от типа облачности. Проанализированы эмпирические функции распределения ширины турбулентных слоев для слоистообразных, волнистообразных, кучевообразных облаков и безоблачного пространства.

© Толмачева Н.И., 2015

Толмачева Наталья Игоревна, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета; 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; nitolmacheva@yandex.ru